

AQUACROP

Version 4.0

Manuel d'utilisation

Reference manual
June 2012

Dirk RAES, Paquale STEDUTO, Theodore C. HSIAO and Elias FERERES
With contributions of the AquaCrop Network



FAO, Land and Water Division, Rome, Italy

Traduction française (Mai 2014):

Joost WELLENS, Lamine DIMZOURE, Martial NTEKAM et Bernard TYCHON



Avec l'appui de l'Association pour la Promotion de l'Éducation et de la Formation à l'Étranger (APEFE) et Wallonie-Bruxelles International (WBI); réalisé dans le cadre du projet www.ge-eau.org.

1. Modèle FAO de productivité de l'eau par culture basé sur la simulation de la réponse du rendement à l'eau

1.1 De l'approche Ky au modèle AquaCrop	1
1.2 Fonctionnement d'AquaCrop	5
1.2.1 Schéma de calcul	5
1.1.2 Etape 1 – Simulation du bilan d'eau du sol	7
1.2.3 Etape 2 – Simulation du développement de la canopée verte (CC)	9
1.2.4 Etape 3 – Simulation de la transpiration d'une culture	12
1.2.5 Etape 4 – Simulation de la biomasse au-dessus du sol (B)	14
1.2.6 Etape 5 – Conversion de biomasse (B) en rendement (Y)	16
1.3 Données d'entrée requises	17
1.3.1 Données climatiques	17
1.3.2 Caractéristiques culturales	18
1.3.3 Caractéristiques du sol	19
1.3.4 Pratiques de gestion	19
1.3 Applications	20
Références	20

2. AquaCrop : manuel d'utilisation

2.1 L'environnement d'AquaCrop	21
2.2 Menu principal	22
2.3 Paramètres par défaut au démarrage	23
2.3.1 Données d'entrée sélectionnées	23
2.4 Sélection des données d'entrée et annulation de la sélection	25
2.4.1 Sélectionner un fichier	25
2.4.2 Annuler la sélection	25
2.5 Affichage et mise à jour des caractéristiques des données d'entrée	26
2.5.1 Affichage des données d'entrée	26
2.5.2 Mise à jour des données d'entrée	27
2.6 Création des fichiers de données d'entrée	28
2.6.1 Enregistrer	28
2.6.2 Enregistrer sous	28
2.6.3 Créer un fichier	28
Créer un fichier climat	28
Créer un fichier ET _o , de pluie ou de température	30
Créer un fichier culture	30
Créer un fichier irrigation	30
Créer un fichier profil de sol	30
Créer un fichier eaux souterraines	30
Créer un fichier projet	30
Créer un fichier données de terrain	31
2.7 Quitter et fermer un menu	32

Structure hiérarchique des menus

Onglet Environnement	33
Climat	33
Culture	33
Gestion	34
Gestion de l'irrigation	34

Gestion de parcelle.....	34
Sol.....	34
Profil de sol.....	34
Eau souterraine	34
Onglet Simulation	35
Onglet Project / Données de terrain	36
2.8 Données climatiques	37
2.8.1 Température minimale et maximale de l'air.....	37
2.8.2 Évapotranspiration de référence (ET _o)	38
2.8.3 Pluviométrie	38
2.8.4 Moyenne annuelle de CO ₂ atmosphérique	38
2.8.5 Paramètres de configuration du programme.....	39
2.9 Caractéristiques culturales.....	40
2.9.1 Description	42
Présentation des modes d'affichage des paramètres de culture	42
Type de champs éditables (cellules)	42
Fichiers Protégés.....	43
2.9.2 Développement.....	47
Couverture initiale de la canopée.....	48
Développement de la canopée	50
Floraison et production (cultures fruitières/céréalières)	52
Formation de racine/tubercule (culture de racine/tubercule)	54
Enfoncement racinaire	55
Températures pour les degrés jours de croissance (DJC)	57
2.9.3 Évapotranspiration.....	58
Coefficients.....	58
Mode d'extraction de l'eau	59
2.9.4 Production.....	61
Productivité de l'eau pour une culture normalisée pour le climat et le CO ₂ (WP*).....	61
Performance sous une concentration atmosphérique élevée de CO ₂	62
Indice de Récolte de référence (HI _o).....	63
2.9.5 Stress hydrique	66
Expansion de la canopée, conductance stomatique et début de sénescence.....	66
Effet du stress de salinité sur les seuils d'épuisement en eau du sol.....	70
Stress d'aération.....	70
Indice de Récolte	72
2.9.6 Stress de température.....	78
Production de biomasse	78
Pollinisation	79
2.9.7 Stress de fertilité du sol	80
Affichage des effets du stress de fertilité du sol	80
Simulation de l'effet du stress de fertilité du sol.....	80
Calibration de la réponse d'une culture	81
2.9.8 Calibration pour le stress de fertilité du sol.....	82
Parcelle de référence et parcelle stressée.....	82
Réponse de la culture au stress de fertilité du sol.....	82
L'effet de stress sur la biomasse n'est pas considéré (pas calibré).....	83
L'effet de stress sur la biomasse est considéré (calibré)	87
2.9.9 Stress de salinité du sol.....	89

Courbe Ks	89
Présentation des effets de stress de salinité du sol.....	90
Calibration de la réponse de la culture.....	91
2.9.10 Calibration pour le stress de salinité du sol	92
Réponse de la culture au stress de salinité du sol	92
Effet de stress sur la biomasse n'est pas encore considéré	93
L'effet du stress sur la biomasse est considéré	98
2.9.11 Calendrier	100
2.9.12 Paramètres de configuration du programme.....	101
2.10 Démarrage du cycle de croissance	102
2.10.1 Spécification de la date.....	102
2.10.2 Début généré.....	102
Début généré sur base de la pluviométrie	102
Début généré sur base des températures de l'air.....	103
2.11 Gestion de l'irrigation	105
2.11.1 Pas d'irrigation (culture hivernale).....	105
2.11.2 Détermination du besoin net en eau d'irrigation	105
2.11.3 Calendrier d'irrigation (événements spécifiés).....	106
2.11.4 Génération des calendriers d'irrigation	106
2.11.5 Méthode d'irrigation.....	108
2.11.6 Qualité d'eau d'irrigation	109
2.12 Gestion de parcelle	109
2.12.1 Fertilité du sol.....	110
2.12.2 Paillis	112
2.12.3 Pratiques en surface de parcelle.....	113
2.12.4 Paramètres de configuration du programme.....	113
2.13 Caractéristiques du profil de sol.....	114
2.13.1 Horizons de sol et leurs caractéristiques physiques.....	114
La teneur en eau du sol à la saturation, à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent	114
Conductivité hydraulique à saturation (K_{sat}).....	115
Eau totale disponible dans le sol (TAW) et le coefficient de drainage (τ)	115
2.13.2 Valeurs indicatives pour les caractéristiques physiques du sol	115
2.13.3 Caractéristiques de la couche de surface du sol	117
2.13.4 Couche de sol restrictive.....	118
2.13.5 Remontée capillaire	119
2.13.6 Paramètres de configuration du programme.....	120
2.14 Caractéristiques de l'eau souterraine.....	121
2.14.1 Profondeur et salinité constantes	121
2.14.2 Caractéristiques variables tout au long de l'année	122
Les caractéristiques ne sont pas liées à une année spécifique	122
Caractéristiques liée(s) à une (aux) année(s) spécifique(s)	124
2.15 Période de simulation	126
2.16 Conditions initiales.....	127
2.16.1 Teneur en eau initiale	127
2.16.2 Salinité initiale du sol	128
2.16.3 L'eau entre diguettes	129
2.16.4 Paramètres de configuration du programme.....	130
Compartiments du sol	130
Paramètres au début de la simulation	130

2.17 Conditions hors-saison	131
2.17.1 Paillis en hors-saison	131
2.17.2 Irrigations en hors-saison	132
2.18 Caractéristiques de projet	133
2.18.1 Simulation d'un projet individuel et de multiples projets	134
2.18.2 Sélectionner et créer un projet	135
Sélectionner un projet	135
Créer un projet	136
2.18.3 Mise à jour des caractéristiques du projet	140
2.19 Données de terrain	141
2.19.1 Access aux menus des données de terrain	141
2.19.2 Spécification des données de terrain	142
2.20 Simulation	143
2.20.1 Présentation des résultats de simulation	143
L'onglet climat-culture-eau du sol	143
Page avec le paramètre sélectionné	144
Onglet profil d'eau du sol	146
Onglet salinité du sol	146
Onglet climat et bilan d'eau	147
Onglet production	148
Onglet synthèse de simulation	149
Onglet environnement de simulation	151
2.20.2 Sortie numérique	152
2.20.3 Evaluation des résultats de simulation	153
Affichage graphique et numérique	153
Indicateurs statistiques	155
2.20.4 Fichiers des données de sortie	158
Résultats journaliers	158
Résultats saisonniers	158

Données d'entrée/sortie et paramètres de programme

2.21 Fichiers des données d'entrée	161
2.21.1 Fichier climat	162
2.21.2 Fichiers température, ETo et pluviométrie	163
2.21.3 Fichier CO2	164
2.21.4 Fichier culture (*.CRO)	164
2.21.5 Fichier irrigation (*.IRR)	164
2.21.6 Fichier gestion de parcelle (*.MAN)	164
2.21.7 Fichier profil de sol (*.SOL)	164
2.21.8 Fichier eaux souterraines (*.GWT)	164
2.21.9 Fichier conditions initiales (*.SW0)	164
2.21.10 Fichier conditions hors-saison (*.OFF)	164
2.21.11 Fichier simulation unique de projet (*.PRO)	164
2.21.12 Fichier simulation projets multiples (*.PRM)	164
2.21.13 Fichier observations de terrain (*.OBS)	164
2.22 Fichiers paramètres de configuration du programme	164
2.23 Fichiers données de sortie	166
2.23.1 Développement et production de la culture	166
2.23.2 Bilan Sol-Eau	167
2.23.3 Teneur en eau du sol (profile et zone racinaire)	168

2.23.4 Salinité du sol (profil et zone racinaire)	168
2.23.5 Teneur en eau du sol (compartiments)	169
2.23.6 Salinité du sol (compartiments).....	169
2.23.7 Besoin net en irrigation	170
2.23.8 Sortie saisonnière.....	171

1 Modèle FAO de productivité de l'eau par culture basé sur la simulation de la réponse du rendement à l'eau

1.1 De l'approche K_y au modèle AquaCrop

La réponse du rendement à l'eau décrit la relation entre le rendement d'une culture et le stress hydrique à la suite d'une pluie trop faible ou d'une dose d'irrigation insuffisante durant la période de croissance. Le document FAO « Irrigation & Drainage Article 33 » (Doorenbos et Kassam, 1979) utilise une fonction de production empirique pour l'estimation de la réponse du rendement à l'eau :

$$\left(1 - \frac{Y}{Y_x}\right) = K_y \left(1 - \frac{ET}{ET_x}\right) \quad (\text{Eq. 1.1a})$$

où Y_x et Y sont le rendement maximal et réel, $(1 - Y/Y_x)$ est le déclin relatif du rendement, ET_x et ET sont respectivement l'évapotranspiration maximale et réelle, $(1 - ET/ET_x)$ le stress hydrique relatif, et K_y un facteur de proportionnalité entre le déclin relatif du rendement et la réduction relative de l'évapotranspiration (Fig. 1.1a).

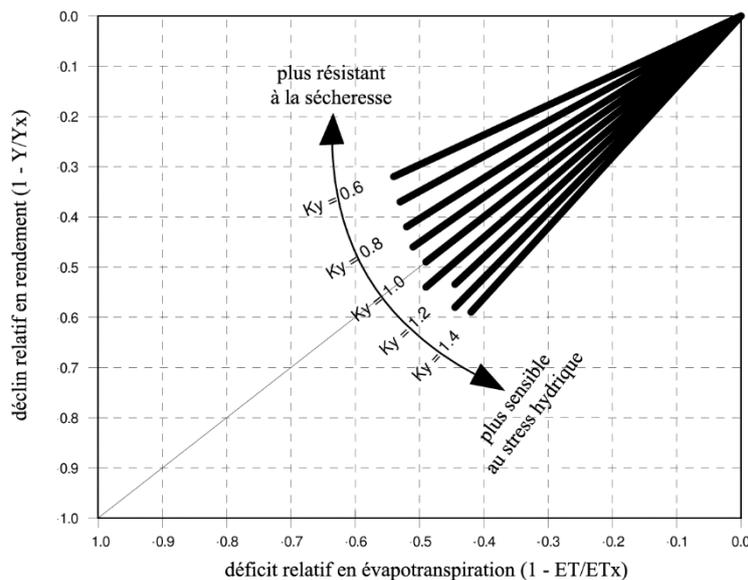


Figure 1.1a - Relation entre le déclin relatif du rendement $(1 - Y/Y_x)$ et le déficit relatif en évapotranspiration $(1 - ET/ET_x)$ pour une période de croissance et pour différents facteurs de réponse du rendement (K_y)

AquaCrop (Steduto et al., 2007 ; Raes et al., 2007 ; Hisao et al., 2007) fait évoluer cette approche basée sur la réponse du rendement, K_y , en distinguant :

- a) Dans l'évapotranspiration réelle (ET), l'évaporation du sol (E) et la transpiration de la culture (Tr) :

$$ET = E + Tr \quad (\text{Eq. 1.1b})$$

La séparation d'ET en évaporation du sol et transpiration de la culture permet de distinguer la consommation en eau productive (transpiration) de la non productive (évaporation du sol). Ceci est surtout important quand la couverture de sol est incomplète au début de la saison ou à la suite d'une plantation clairsemée.

- b) dans le rendement final (Y), la biomasse (B) et l'indice de récolte (HI) :

$$Y = HI (B) \quad (\text{Eq. 1.1c})$$

La séparation dans le calcul du rendement entre biomasse et indice de récolte, permet la partition des relations fonctionnelles correspondantes, en réponses aux conditions environnementales. Ces réponses sont fondamentalement différentes et leur séparation permet de bien distinguer l'impact différent des stress hydriques sur B et sur HI.

Ces changements mènent à l'équation suivante, qui est au cœur du moteur de croissance d'AquaCrop :

$$B = WP \cdot \Sigma Tr \quad (\text{Eq. 1.1d})$$

où Tr est la transpiration de la culture (en mm) et WP est le paramètre de productivité de l'eau (kg de biomasse par m² et par mm d'eau de transpiration cumulée durant la période de production de biomasse). Cette démarche utilisant les équations 1.1a à 1.1d a une implication fondamentale sur la robustesse du modèle en raison du caractère conservateur de WP (Steduto et al., 2007). Il est important de remarquer que les deux équations ont l'eau comme force motrice pour la croissance des cultures.

Afin d'être fonctionnelle, l'équation 1.1d a été placée dans un modèle comprenant des composantes précises telles que : *le sol*, avec son bilan en eau ; *la culture*, avec ses processus de développement, de croissance et de constitution du rendement ; et *l'atmosphère*, avec son régime thermique, la pluviométrie, la demande évaporatoire et la concentration en dioxyde de carbone. En plus, quelques aspects de *gestion* ont été considérés explicitement (ex. irrigation, fertilisation, etc.), vu qu'ils affecteront le bilan d'eau du sol, le développement de la culture, et de cette manière la production finale. AquaCrop peut aussi simuler la croissance des cultures sous des scénarii de changement climatique (réchauffement global et concentration plus élevée en dioxyde de carbone). L'impact des ravageurs, maladies et mauvaises herbes n'est pas encore considéré. Les relations fonctionnelles entre ces différents composants du modèle sont présentées dans le Fig. 1.1b et décrit dans la section 1.2.

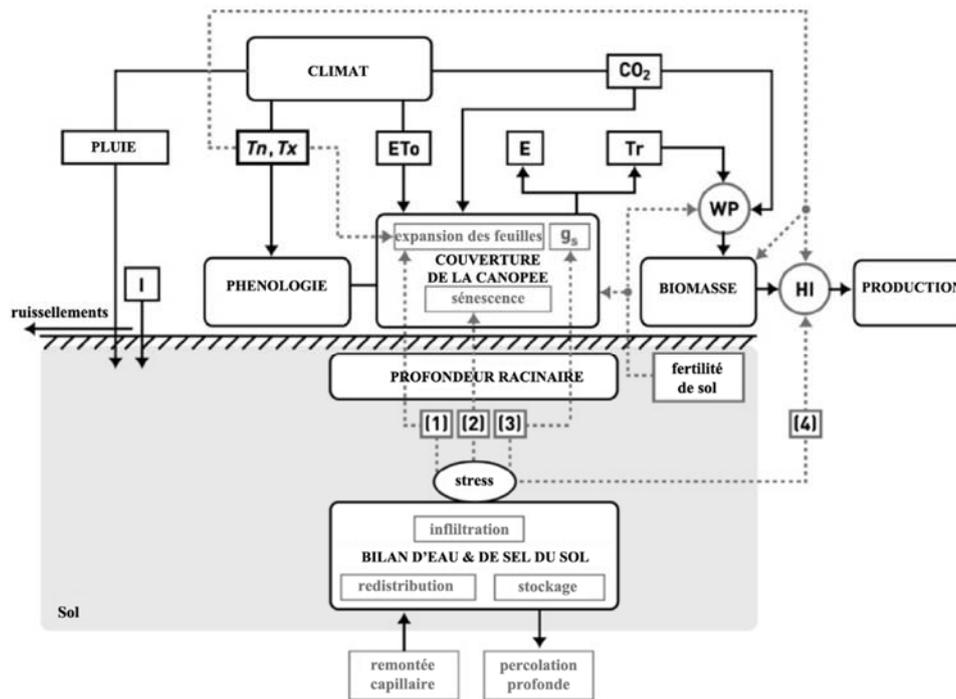


Figure 1.1b - Schéma d'AquaCrop présentant les composants principaux du continuum sol-plante-atmosphère et les paramètres caractérisant la phénologie, la couverture de la canopée, la transpiration, la production de biomasse et le rendement final.

(I, irrigation ; T_n , température minimale de l'air ; T_x , température maximale de l'air ; ETo , évapotranspiration de référence ; E , évaporation du sol ; Tr , transpiration de la canopée ; g_s , conductance stomatique ; WP, productivité de l'eau ; HI, indice de récolte ; CO_2 , concentration atmosphérique en dioxyde de carbone ; (1), (2), (3), (4), fonctions de réponse au stress hydrique sur : l'expansion des feuilles, la sénescence, la conductance stomatique et l'indice de récolte)

Les traits continus indiquent les liens directs entre les variables et les processus. Les traits interrompus indiquent les feed-backs. Voir section 1.2 pour une description détaillée.

Les caractéristiques qui différencient AquaCrop d'autres modèles de cultures sont :

- son focus sur l'eau ;
- l'utilisation de la couverture par la canopée au lieu de l'indice foliaire ;
- l'utilisation de valeurs normalisées de productivité de l'eau (WP) pour des demandes évaporatoires et des concentrations de CO_2 , qui confèrent au modèle une grande capacité d'extrapolation pour divers emplacements, saisons et climats, y inclus des scénarii de climats futurs ;
- le relativement petit nombre de paramètres ;
- des données d'entrée qui nécessitent le plus souvent des paramètres et variables explicites et souvent intuitifs ;
- une interface utilisateur facile à l'emploi et intuitive ;
- son équilibre considérable entre la précision, la simplicité et la robustesse ;
- la possibilité de l'appliquer dans des divers systèmes agricoles existants à travers le monde.

Quoique le modèle soit relativement simple, il met en valeur les processus fondamentaux impliqués dans la productivité des cultures et dans les réponses aux déficits en eau tant d'un point de vue physiologique qu'agronomique.

Il est important de réaliser que beaucoup de modèles de culture existent dans la littérature qui simulent la réponse du rendement à l'eau. Ils sont le plus souvent utilisés par des scientifiques, des étudiants et des usagers spécialisés dans l'agriculture commerciale. Mais, ces modèles présentent souvent des complexités substantielles et sont rarement utilisés par la majorité du public cible de la FAO ; comme les agents de vulgarisation et d'encadrement, les associations des usagers de l'eau, les ingénieurs et consultants, les gestionnaires des périmètres irrigués et des exploitations, les décideurs et les économistes. En plus, ces modèles requièrent un nombre important de variables et paramètres d'entrée qui ne sont pas facilement disponibles pour des diverses cultures et sites à travers le monde. Certaines de ces variables sont beaucoup plus familières aux scientifiques qu'aux utilisateurs finaux (ex. indice foliaire ou potentiel hydrique des feuilles). Finalement, la transparence insuffisante et la trop grande complexité de la structure des modèles sont des fortes contraintes pour que l'utilisateur final les adopte.

1.2 Fonctionnement d'AquaCrop

1.2.1 Schéma de calcul

Un schéma de calcul d'AquaCrop est présenté dans la Fig. 1.2a. A un pas de temps journalier, le modèle simule successivement les processus suivants :

1. Le bilan d'eau du sol. La quantité d'eau stockée dans la zone racinaire est simulée en comptabilisant les flux d'eau entrants et sortants à ses frontières. L'épuisement de la réserve en eau dans la zone racinaire détermine la magnitude d'une série de coefficients de stress en eau (K_s), affectant : (a) l'expansion de la canopée verte (CC), (b) la conductance stomatique et par conséquent la transpiration (Tr) par unité de CC , (c) la sénescence et le déclin de la canopée, (d) l'indice de récolte et (e) le taux d'enracinement dans la zone racinaire.

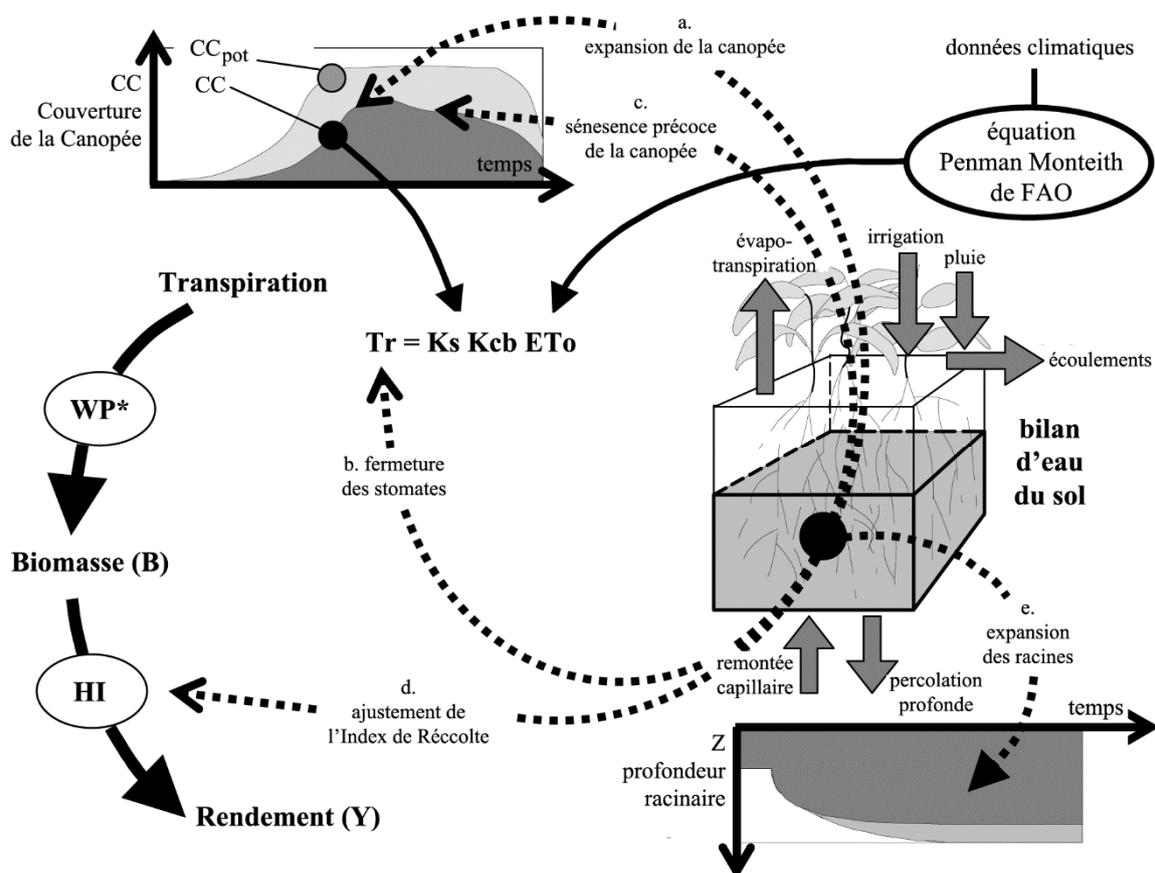


Figure 1.2a - Schéma de calcul d'AquaCrop indiquant (en flèches pointillés) les processus affectés par le stress hydrique (a à e). CC est la couverture de canopée simulée, CC_p la couverture potentielle de canopée, K_s le coefficient de stress en eau, K_{cb} le coefficient de culture, E_{To} l'évapotranspiration de référence, WP^* la productivité de l'eau pour une culture normalisée, et HI l'indice de récolte

2. Le développement de la culture. Pour la simulation du développement de la culture, l'expansion de la canopée est séparée de l'expansion de la zone racinaire. L'interdépendance entre ces deux expansions est indirecte via le stress hydrique. AquaCrop utilise la couverture de canopée pour la description du développement de la culture. La canopée est une caractéristique cruciale d'AquaCrop. A travers son expansion, vieillissement, conductance

et sénescence, il détermine la quantité d'eau transpirée (Tr), qui en retour détermine la quantité de biomasse (B) produite et le rendement final (Y). Si un stress hydrique se produit, la CC simulée sera inférieure à la couverture potentielle de la canopée (CC_{pot}) pour des conditions sans stress, et la profondeur maximale des racines ne pourra pas être atteinte (zones sombres dans Fig. 1.2a).

3. Transpiration de la culture (Tr). La transpiration d'une culture est obtenue en multipliant la force évaporatoire de l'atmosphère (ET_o) par un coefficient cultural. Le coefficient cultural (K_{cb}) est proportionnel à CC , et est en conséquence continuellement modifié. La force évaporatoire est exprimée par l'évapotranspiration de référence (ET_o), déterminée par la FAO selon l'équation de Penman-Monteith. Si un stress hydrique provoque une fermeture de stomates, le coefficient de stress lié à la conductance stomatique (K_s) diminuera et, par là, la transpiration. La couverture de canopée verte et la durée représentent les sources pour la transpiration, la conductance stomatique représente l'intensité de transpiration.
4. Biomasse au-dessus de sol (B). Le cumul de la quantité d'eau transpirée (Tr) se traduit en une quantité proportionnelle de biomasse, produite à travers la productivité de l'eau (Eq. 1.1c). Dans AquaCrop, la productivité normalisée de l'eau normalisée (WP^*) pour la demande atmosphérique et les concentrations en CO_2 de l'air est utilisée. Elle exprime une forte relation entre l'assimilation photosynthétique de CO_2 ou la production de biomasse, et la transpiration, indépendamment des conditions climatiques. Excepté la partition de la biomasse en rendement (Etape 5), il n'y a pas de partitions de la biomasse au-dessus du sol entre les différents organes. Ce choix permet d'éviter de devoir traiter des processus de partitionnement des assimilats entre organes qui restent parmi les moins compris et plus difficiles à modéliser.
5. Conversion de la biomasse en rendement (Y). Etant donné la biomasse simulée au-dessus du sol (B), le rendement de la culture est obtenu à l'aide de l'indice de récolte (Eq. 1.1c). Suite à l'évolution journalière des stress hydrique et/ou de température, HI est continuellement ajusté durant la formation du rendement.

1.2.2 Etape 1 – simulation du bilan d'eau du sol

D'une manière schématique, la zone racinaire peut être considérée comme un réservoir d'eau (Fig. 1.2b). En additionnant les flux d'eau entrants (pluviométrie, irrigation et remontée capillaire) et sortants (ruissellements, évapotranspiration et percolation profonde) aux limites de la zone racinaire, la quantité d'eau retenue dans la zone racinaire et l'épuisement en eau de la zone racinaire peuvent être calculés à chaque moment de la saison à travers le bilan d'eau du sol.

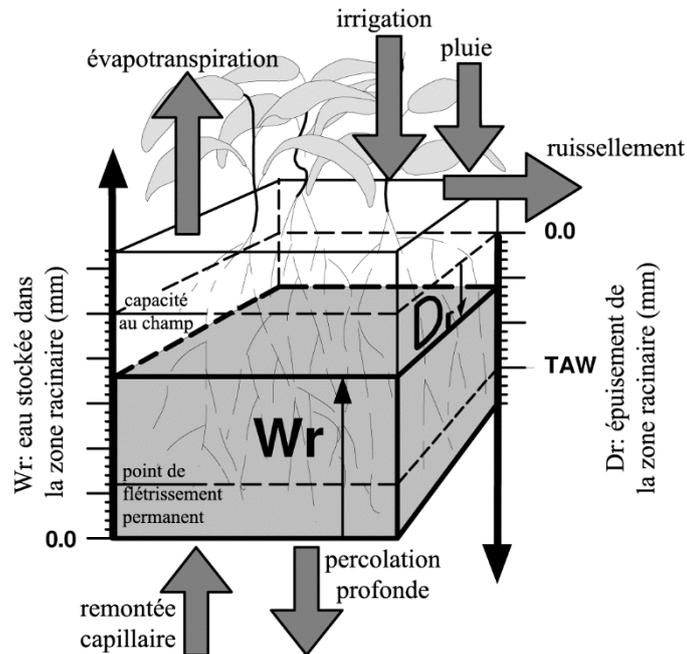


Figure 1.2b - La zone racinaire comme un réservoir indiquant les flux à ses limites affectant l'eau stockée (W_r) dans la zone racinaire et l'épuisement en eau (D_r) de la zone racinaire

Afin de décrire de manière fidèle les ruissellements, l'infiltration et la rétention d'eau, le mouvement d'eau et de sel, et afin de séparer l'évaporation du sol de la transpiration de la culture, AquaCrop divise le profil de sol et l'axe de temps en petites fractions. Les simulations se font à un pas de temps journalier (Δt), et le profil de sol est divisé en 12 compartiments (Δz), dont les tailles sont ajustées pour couvrir toute la zone racinaire.

L'effet du stress hydrique est décrit par des coefficients de stress (K_s). Au-dessus d'un seuil supérieur d'épuisement en eau de la zone racinaire, le stress en eau est non-existant ($K_s = 1$) et le processus n'est pas affecté. Le stress en eau commence à affecter un processus spécifique (par exemple la transpiration) quand l'eau du sol retenue dans la zone racinaire tombe en dessous d'un seuil supérieur (Fig. 1.2c). En-dessous d'un seuil inférieur, l'effet est maximal ($K_s = 0$) et le processus est complètement arrêté. Entre ces deux seuils, la forme de la courbe de K_s détermine l'ampleur du stress en eau du sol sur le processus. Comme l'effet de stress en eau peut être différent au long des processus, chaque processus a ses propres coefficients K_s et seuils.

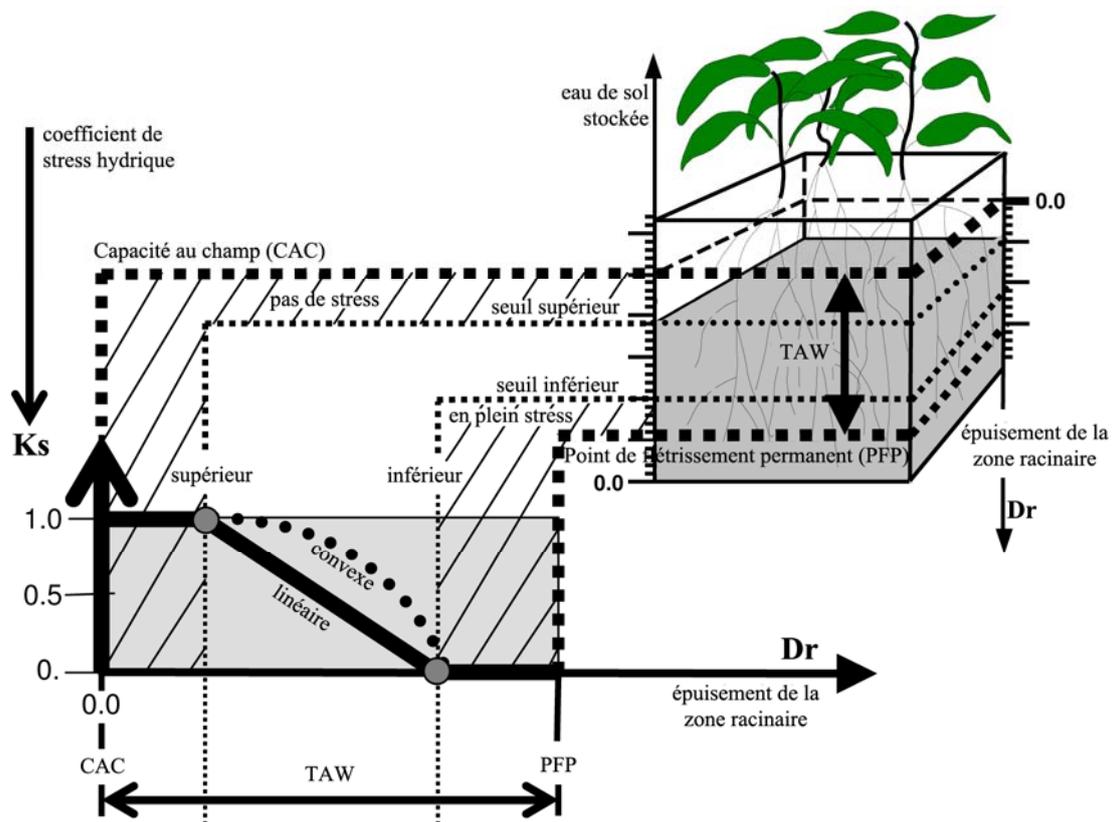


Figure 1.2c - Le coefficient de stress (K_s) pour différents degrés d'épuisement en eau de la zone racinaire (D_r). TAW représente le total de l'eau disponible dans la zone racinaire et est la différence entre les teneurs en eau à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent

1.2.3 Etape 2 – Simulation du développement de la canopée verte (CC)

Au lieu de l'indice foliaire (LAI), AquaCrop utilise la couverture de canopée verte (CC) pour exprimer le développement du feuillage. CC est la fraction de la surface du sol couverte par la canopée verte. Sous des conditions optimales, le développement de la canopée est décrit par seulement quelques paramètres de culture qui peuvent être récupérés dans le fichier de culture au début des simulations :

- couverture initiale de la canopée à une émergence de 90% (CC_0) ;
- couverture maximale de la canopée, quand la canopée est entièrement développée (CC_x) ;
- coefficient de croissance de canopée (CGC), utilisé pour décrire l'expansion de la canopée entre l'émergence de la culture et son développement complet ;
- coefficient de déclin de canopée (CDC), utilisé pour décrire la phase de déclin à cause de la sénescence des feuilles quand la culture approche de la maturité.

La Figure 1.2d présente l'évolution de la couverture de canopée verte à travers le cycle de croissance en absence de stress.

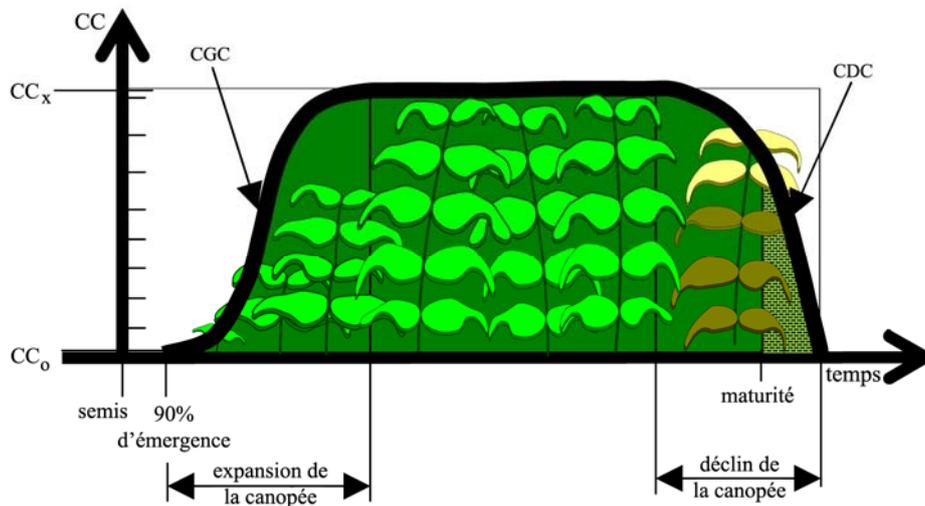


Figure 1.2d - Evolution de la couverture de canopée verte (CC) à travers le cycle de croissance en absence de stress. CC_0 et CC_x sont les couvertures de canopée verte initiale et maximale, respectivement ; CGC est le coefficient de croissance de canopée verte ; CDC est le coefficient de déclin de canopée verte

L'effet du stress en eau sur l'expansion de la canopée est simulé en multipliant le coefficient de croissance de canopée (CGC) avec le coefficient de stress en eau pour l'expansion de la canopée ($K_{Sexp,w}$). Quand l'épuisement en eau de la zone racinaire s'accroît et tombe en dessous du seuil supérieur, le coefficient de stress devient plus petit que 1 et l'expansion de la canopée commence à se réduire (Fig. 1.2c). Quand le seuil inférieur de l'épuisement de la réserve en eau de la zone racinaire est atteint, $K_{Sexp,w}$ égale zéro, et le processus s'arrête complètement. Par conséquent, CC_x ne pourra pas être atteinte, ou beaucoup plus tard que décrit dans la Figure 1.2d pour des conditions sans stress.

La sénescence précoce de la canopée est déclenchée quand le stress devient sévère. Par conséquent, le seuil supérieur d'épuisement en eau de la zone racinaire pour la sénescence est beaucoup plus bas dans Fig. 1.2c et s'approche du point de flétrissement permanent. Le degré de sénescence est décrit par la valeur du coefficient de stress en eau pour la sénescence précoce de la canopée (K_{Ssen}), qui modifie le coefficient de déclin de canopée (CDC). A cause de la

sénescence précoce de la canopée, le cycle de la culture peut devenir beaucoup plus court que sous conditions sans stress. La simulation de la couverture de canopée verte (CC), souffrant de stress hydrique durant le cycle de la culture, est présentée dans la Figure 1.2e.

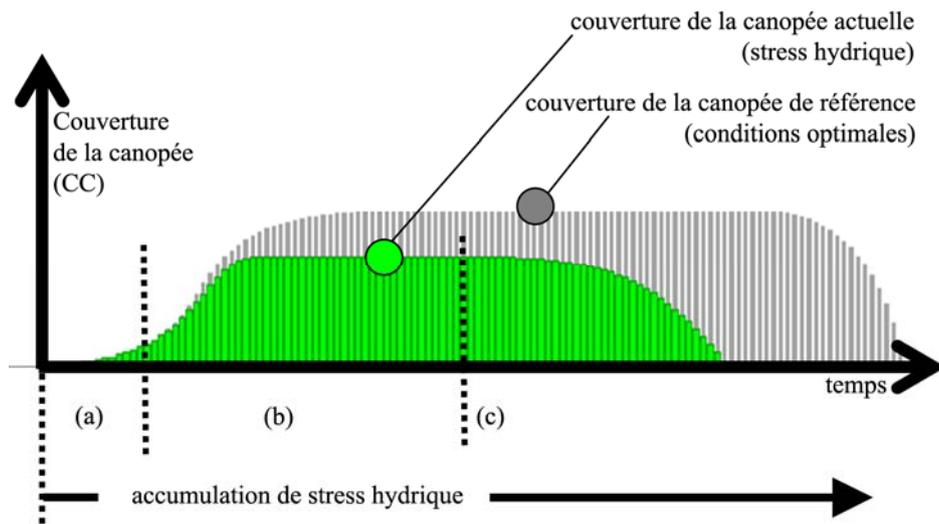


Figure 1.2e - Simulation de couverture de canopée verte (CC) quand le stress en eau s'accumule durant le cycle de la culture, comparée avec le développement de la canopée en absence de stress (CC_{pot}). Avec l'indication des périodes (a) pas d'effet de stress en eau sur le développement de la canopée ; (b) stress en eau affectant l'expansion des feuilles ; (c) stress hydrique déclenchant un déclin précoce de la canopée

D'autres facteurs/stress affectant CC et considérés par AquaCrop sont :

- stress lié à la température de l'air. L'effet de la température de l'air sur le développement de la canopée est pris en compte dans AquaCrop en utilisant les degrés jours de croissance (DJC). Afin de pouvoir calculer les DJC, une température de base (en dessous de laquelle le développement de la culture est impossible) et une température supérieure (au-dessus de laquelle le développement de la culture s'arrête) sont requises ;
- stress de salinité du sol. Comme la salinité du sol réduit la disponibilité en eau dans le réservoir de la zone racinaire, la présence des sels dissous augmente l'effet du stress hydrique du sol. Ceci est simulé dans AquaCrop en déplaçant les seuils de la Figure 1.2c vers la capacité au champ ;
- stress de nutriments minéraux. AquaCrop ne simule pas les cycles et bilan nutritifs, mais fournit une série de coefficients de stress de fertilité du sol (K_s) afin de simuler l'effet de fertilité du sol sur la capacité de croissance de la culture, et la couverture maximale de canopée (CC_x) qui peut être atteinte en mi-saison. Une distinction est faite entre un coefficient de fertilité du sol pour l'expansion de feuilles ($K_{s_{exp, f}}$) qui réduit la CGD, et un coefficient de fertilité du sol pour la couverture maximale de canopée ($K_{s_{CCx}}$) qui réduit CC_x . En plus des effets sur l'expansion des feuilles et la couverture maximale de canopée, AquaCrop simule un déclin régulier de la couverture de canopée dès que CC_x est atteinte (Fig. 1.2f). Le déclin moyen journalier est donné par un facteur de déclin ($f_{CDecline}$).

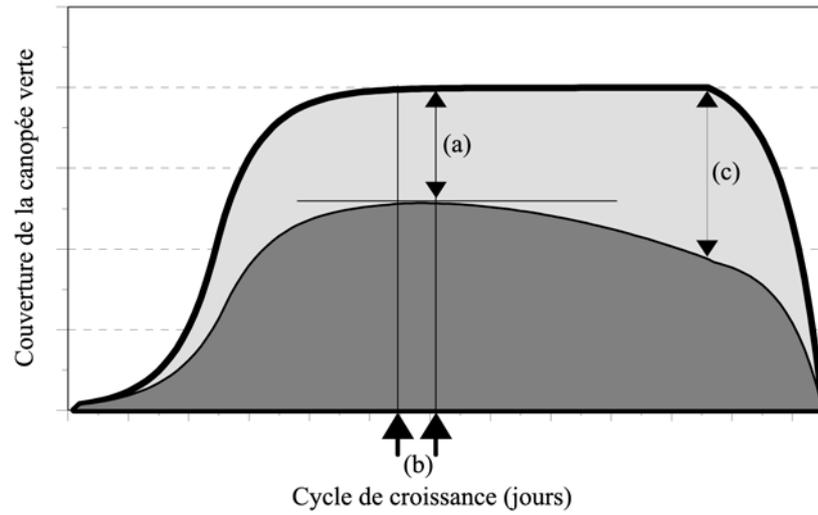


Figure 1.2f - Couverture de canopée verte (CC) pour une fertilité du sol non-limitée (zone claire) et limitée (zone sombre) avec indication des processus résultant en (a) une couverture de canopée moins dense, (b) un développement de la canopée plus lent, et (c) un déclin régulier de CC dès que la couverture maximale de la canopée est atteinte

1.2.4 Etape 3 – Simulation de la transpiration d’une culture

La transpiration d’une culture (Tr) est calculée en multipliant la force évaporatoire de l’atmosphère par un coefficient de culture (Kcb), et en considérant les stress en eau (Ks) :

$$Tr = Ks (Kcb_x \cdot CC^*) ET_o \quad (\text{Eq. 1.2a})$$

où la force évaporatoire (ET_o) est exprimée par l’évapotranspiration de référence d’un gazon, comme déterminé par l’équation de FAO Penman-Monteith. Le coefficient de transpiration d’une culture (Kcb) est proportionnel à la couverture de canopée (CC) et est par conséquent continuellement ajusté au développement de la canopée simulée. Le facteur de proportionnalité (Kcb_x) intègre tous les effets des caractéristiques qui distinguent la transpiration de la culture de la surface de référence (gazon). Quand la culture se développe, Kcb_x est ajusté pour les effets de vieillissement et de sénescence. Dans Eq. 1.2a, CC est remplacée par CC^* afin de tenir compte de la micro-advection entre les raies de cultures, qui fournit une énergie supplémentaire pour la transpiration de la culture. Quand la couverture de canopée n’est pas complète, cette contribution est substantielle (Fig. 1.2g).

Un manque ou un excès en eau dans la zone racinaire peuvent contribuer à la réduction de la transpiration de la culture. Ceci est simulé en considérant des coefficients de stress en eau (Ks). Quand un manque d’eau dans la zone racinaire provoque une fermeture de stomates, un coefficient de stress pour la fermeture des stomates (Ks_{sto}) est considéré. Quand un excès en eau résulte en des conditions anaérobiques, l’effet du stress sur la transpiration est exprimé par un coefficient d’engorgement d’eau (Ks_{aer}). Selon les règles générales d’AquaCrop, le coefficient de stress varie entre 1, quand le stress en eau est non-existant, et 0, quand le stress est au maximum de sa force et la transpiration de la culture est complètement arrêtée. La simulation de la transpiration de la culture, affectée par un stress en eau durant le cycle de la culture, est présentée dans la Figure 1.2h.

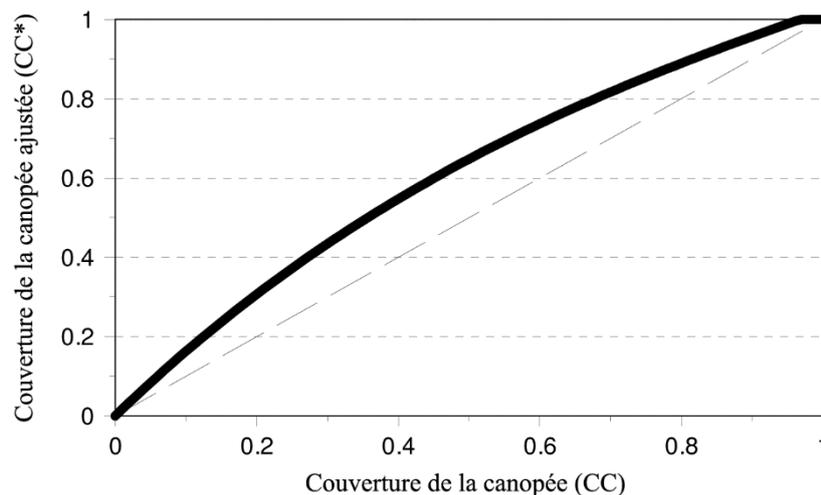


Figure 1.2g - Couverture de canopée (CC^*) ajustée pour les effets de micro-advection (ligne en gras) pour différentes fractions de couverture de canopée verte (CC)

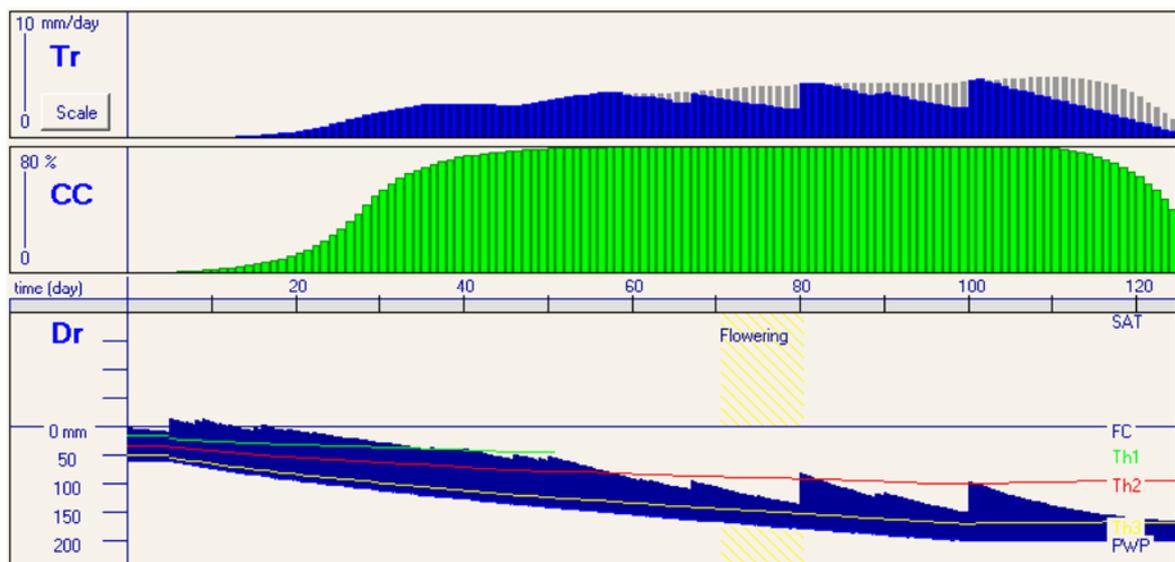


Figure 1.2h - Simulations de l'épuisement en eau de la zone racinaire (Dr), de la couverture de canopée verte (CC) et de la transpiration de la culture (Tr) tout au long du cycle de la culture. Avec indication des seuils de stress en eau affectant le développement de la canopée (Th1), incitant la fermeture des stomates (Th2) et provoquant une sénescence précoce de la canopée (Th3)

1.2.5 Etape 4 - Simulation de la biomasse au-dessus du sol (B)

La productivité de l'eau pour une culture (WP) exprime la matière sèche au-dessus du sol (gr ou kg) produite par unité de surface du sol (m^2 ou ha) et par unité d'eau transpirée (mm). Plusieurs expériences ont montré que la relation entre la biomasse produite et l'eau consommée pour une certaine culture est fortement linéaire dans des conditions climatiques données (Eq.1.1d).

Pour tenir compte de conditions climatiques spécifiques, AquaCrop utilise la productivité normalisée de l'eau (WP*) pour simuler la biomasse au-dessus du sol. L'objectif de la normalisation est de rendre WP applicable aux divers endroits et saisons, en ce inclus des scénarii de changement de climat. La normalisation consiste en une normalisation pour :

- la concentration atmosphérique en CO_2 . La normalisation de CO_2 consiste à considérer la productivité de l'eau d'une culture pour une concentration atmosphérique de CO_2 de 369.41 ppm (parts volumiques par million). La valeur de référence de 369.41 est la moyenne de concentration atmosphérique en CO_2 pour l'année 2000, mesurée à l'Observatoire de Maunua Loa (Hawaii, USA).
- la demande évaporatoire de l'atmosphère. La normalisation pour le climat est obtenue en divisant le total journalier d'eau transpirée (Tr) par l'évapotranspiration de référence pour ce jour.

Des études récentes ont indiqué qu'après normalisation, les cultures peuvent être groupées en classes ayant une WP* similaire (Fig. 1.2i). Une distinction peut être faite entre des cultures de type C4 avec une WP* d'environ 30 à 35 gr/m^2 (ou 0.30 à 0.35 tonne par ha) et des cultures de type C3 avec une WP* d'environ 15 à 20 gr/m^2 (ou 0.15 à 0.20 tonne par ha).

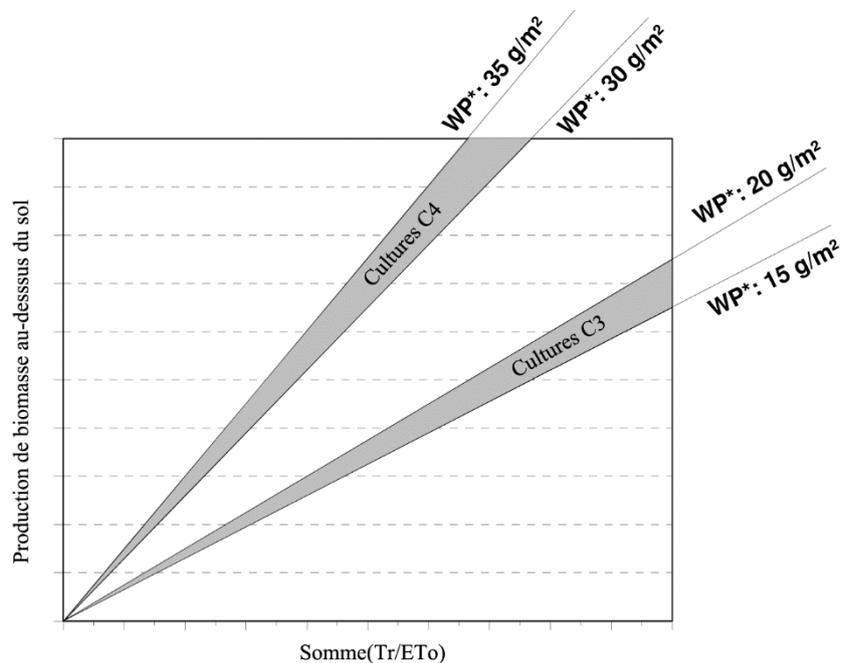


Figure 1.2i - Relation entre la biomasse au-dessus du sol et le total d'eau transpirée pour des cultures de type C3 et C4 après normalisation avec le CO_2 et ET_0

La biomasse au-dessus du sol produite pour chaque jour du cycle de la culture est obtenu en multipliant WP* avec le rapport de la transpiration de la culture et l'évapotranspiration de référence pour ce jour (Tr/ET_0). La production de biomasse pourrait être ralentie quand la

température de l'air est trop froide, indépendamment du taux de transpiration et de ET_0 . Ceci est pris en compte dans AquaCrop en considérant le coefficient de stress de température (K_{sb}) :

$$B = K_{sb} \cdot WP^* \cdot \sum_i \frac{Tr_i}{ET_{0i}} \quad (\text{Eq. 1.2b})$$

Si la température exprimée en degrés jours au cours d'une journée descend sous un seuil supérieur, une conversion totale de transpiration en biomasse ne peut plus être atteinte, et K_{sb} devient plus petit que 1. L'indice K_{sb} peut même arriver à 0 quand il fait trop froid pour générer des degrés jours de croissance. La production de biomasse simulée tout au long du cycle de la culture pour le développement de la canopée et la transpiration de la culture repris en Figure 1.2h est affichée à la Figure 1.2j.

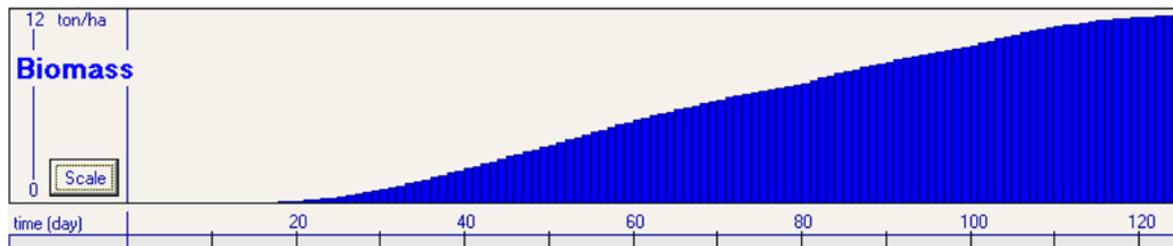


Figure 1.2j - Simulation de la production de biomasse pour la culture dont le développement de canopée et la transpiration est donné à la Fig. 1.2h

Pendant la simulation, WP^* normalisée pourra être ajustée afin de considérer :

- une concentration atmosphérique de CO_2 différente de 369.41 ppm, valeur de référence (i.e. la concentration pour l'an 2000 à l'Observatoire Mauna Loa à Hawaii). Ceci est simulé en multipliant WP^* avec un facteur de correction. Le facteur de correction est plus grand que 1 quand la concentration en CO_2 dépasse les 369.41 ppm, et plus petit que 1 lorsque la concentration en CO_2 est inférieure à la valeur de référence ;
- le type de produits qui sont synthétisés durant la formation de rendement. S'ils sont riches en lipides ou protéines, beaucoup plus d'énergie par unité de poids sec est requis qu'avec la synthèse d'hydrates de carbone. Par conséquent, la productivité de l'eau durant la formation de rendement doit être réduite. Ceci est simulé en multipliant WP^* avec un coefficient de réduction pour les produits synthétisés ;
- une fertilité du sol limitée. Comme le stress de fertilité du sol pourrait diminuer la productivité de l'eau de la culture, l'effet de stress est simulé à l'aide du coefficient de stress de fertilité du sol pour la productivité de l'eau de la culture (K_{swp}), qui varie entre 1 et 0. Quand le stress de fertilité du sol n'affecte pas le processus, K_{swp} est 1 et WP^* n'est pas ajustée.

1.2.6 Etape 5 – Conversion de la biomasse (B) en rendement (Y)

A partir de la floraison ou de l'initiation de tubercule, l'Indice de Récolte (HI) augmente graduellement pour atteindre sa valeur de référence (HI_o) à la maturité physiologique (Fig. 1.2k). Si les stades de construction et remplissage des grains/fruits ou de tubercules sont trop courts suite à une sénescence précoce de la canopée, cela pourrait conduire à une photosynthèse inadéquate et donc à une réduction de l'Indice de Récolte. Pour les cultures visant la production de feuilles, HI augmente dès la germination et atteint rapidement HI_o.

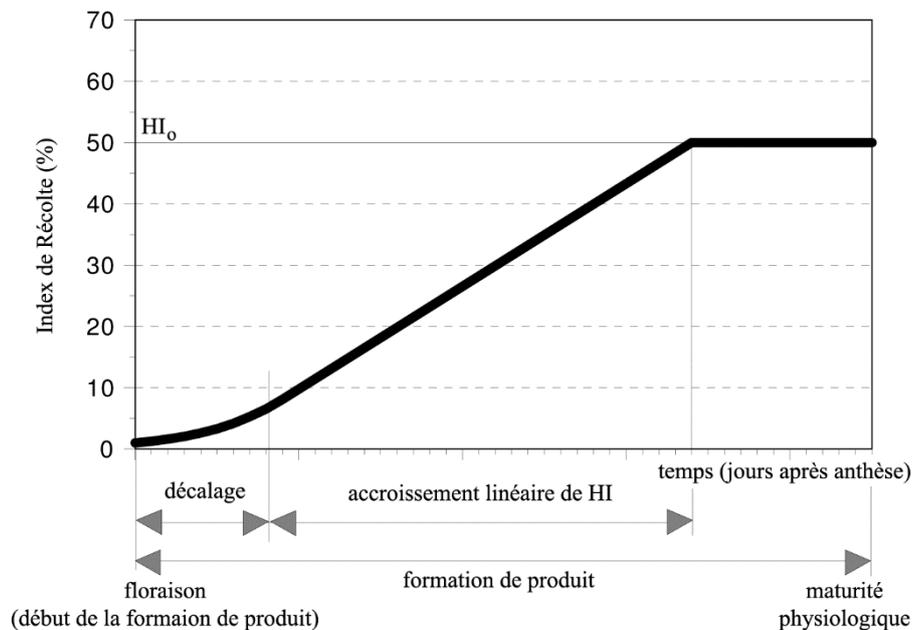


Figure 1.2k - Augmentation de l'Indice de Récolte à partir de la floraison jusqu'à la maturité physiologique pour des cultures fruitières et céréalières

Le rendement (Y) est obtenu en multipliant la biomasse au-dessus du sol (B) avec l'Indice de Récolte de référence ajusté :

$$Y = f_{HI} HI_o B \quad (\text{Eq. 1.2c})$$

où f_{HI} est un multiplicateur pour pouvoir considérer les stress qui corrigent l'Indice de Récolte de référence. Cet ajustement de l'Indice de Récolte au déficit hydrique et aux températures de l'air dépend des périodes, de la durée, et de l'ampleur du stress durant le cycle de culture. L'effet du stress sur l'Indice de Récolte peut être positif ou négatif. Une distinction est faite entre les stress avant la formation de rendement, au moment de la floraison qui pourrait influencer la pollinisation, et durant la formation de rendement.

1.3 Données d'entrée requises

AquaCrop utilise un nombre relativement réduit de paramètres explicites et de variables d'entrée (souvent intuitives), qui sont facilement disponibles ou qui nécessitent des méthodes simples pour leur détermination. Les données d'entrée consistent en des données climatiques, des caractéristiques culturales et de sol, et des pratiques de gestion, qui définissent l'environnement dans lequel la culture se développera (Fig. 1.3). Les données d'entrée sont stockées dans des fichiers de climat, de culture, de sol et de gestion. Elles peuvent être facilement changées à travers l'interface utilisateur.

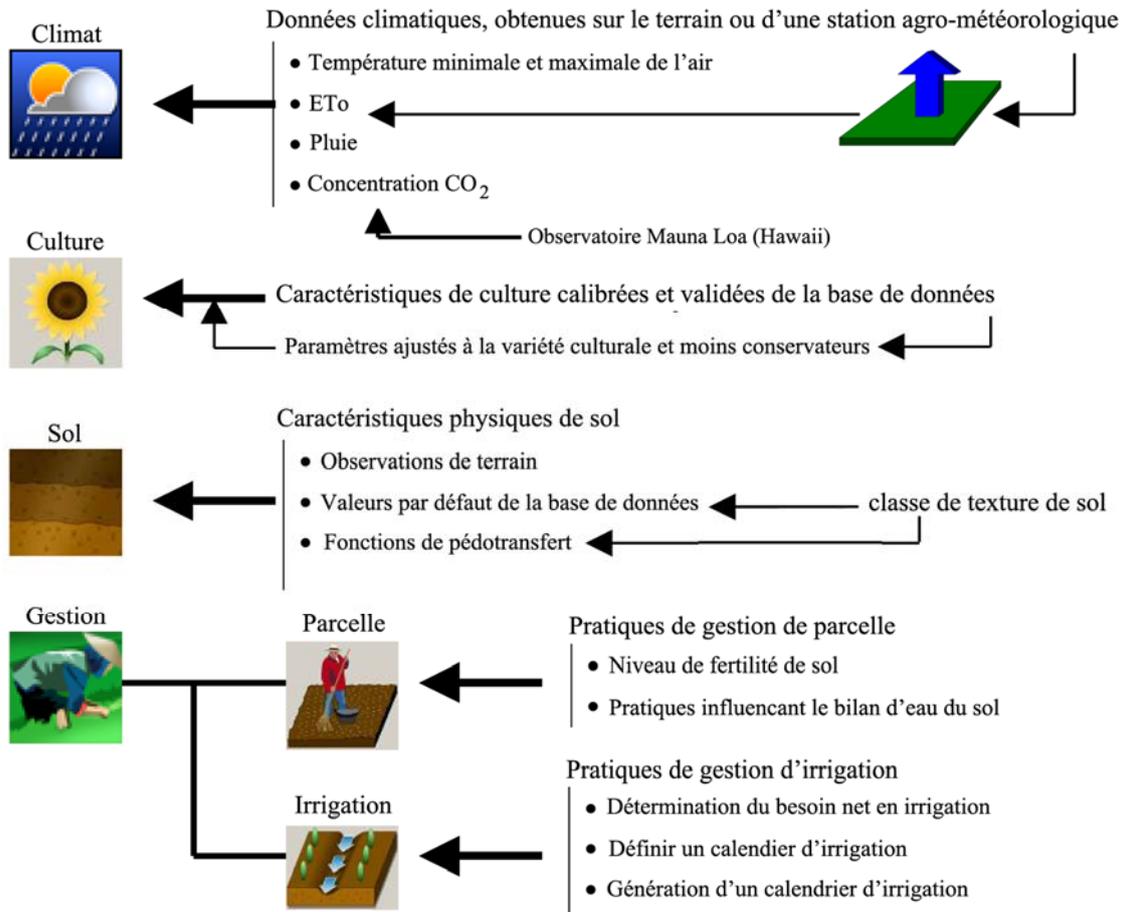


Figure 1.3 - Données d'entrée définissant l'environnement dans lequel la culture va se développer

1.3.1 Données climatiques

Pour chaque jour de simulation, AquaCrop a besoin des températures minimale (T_n) et maximale (T_x) de l'air, de l'évapotranspiration de référence (ET_o) comme une mesure pour la demande évaporatoire de l'atmosphère, et de la pluviométrie. En plus, la concentration moyenne annuelle de CO_2 doit être connue. La température influence le développement de la culture (phénologie) et, si limitée, la croissance et l'accumulation de biomasse. La pluviométrie et l' ET_o sont déterminants pour le calcul du bilan d'eau de la zone racinaire, et la concentration atmosphérique de CO_2 affecte la productivité de l'eau de la culture.

L'ET_o est obtenue des données météorologiques à l'aide de l'équation FAO Penman-Monteith (comme spécifié dans Irrigation and Drainage Paper Nr 56). Un calculateur d'ET_o (ET_o calculator) peut être téléchargé gratuitement du site de la FAO. Les données climatiques peuvent être saisies dans tout un éventail d'unités, et des procédures sont disponibles dans le calculateur pour estimer les données climatiques manquantes.

Les données journalières, décadaires ou mensuelles de la température de l'air, de l'ET_o et de la pluviométrie sont sauvegardées dans des fichiers de climat que le logiciel ira récupérer au moment des simulations. En absence des données climatiques journalières, le logiciel dérive les valeurs journalières de température, ET_o et pluviométrie à partir des moyennes décadaires ou mensuelles. Quant à la pluviométrie, caractérisée par une distribution extrêmement hétérogène dans le temps, l'utilisation des données pluviométriques décadaires ou mensuelles pourrait réduire la précision des simulations.

En outre, AquaCrop fournit une série historique des moyennes annuelles de concentration atmosphérique de CO₂ mesuré à l'Observatoire de Mauna Loa à Hawaii. Les concentrations prévues dans un futur proche sont également fournies. Les données sont utilisées pour ajuster la WP* par rapport à la concentration en CO₂ pour l'année de simulation. L'utilisateur peut également entrer d'autres valeurs futures de CO₂ afin d'évaluer les effets du changement climatique.

1.3.2 Caractéristiques culturelles

Bien que basé sur des processus biophysiques basiques et complexes, AquaCrop utilise un relativement petit nombre de paramètres de culture pour décrire les caractéristiques culturelles. La FAO a calibré les paramètres de culture pour la majeure partie des cultures agricoles et les fournit comme valeur par défaut dans le modèle. Quand une culture est sélectionnée, ses paramètres de cultures sont chargés. Une distinction est faite entre des paramètres conservateurs, spécifiques à la variété, et moins conservateurs :

- Les paramètres de culture conservateurs ne sont matériellement pas affectés par le temps, les pratiques de gestion ou l'emplacement géographique. Ils ont été calibrés avec des données d'une culture cultivée dans des conditions favorables et non-limitantes. Ils restent applicables dans des conditions de stress à travers les fonctions de réponse aux stress. De cette manière, les paramètres conservateurs ne nécessitent pas d'ajustement aux conditions locales et peuvent être directement utilisées dans les simulations.
- Les paramètres de culture spécifiques à une variété peuvent nécessiter un ajustement quand on sélectionne une variété différente de celle utilisée pour la calibration. Les paramètres de culture moins conservateurs sont influencés par la gestion de la parcelle, les conditions dans le profil du sol ou le climat (surtout quand on simule en mode jour calendrier). Ces paramètres pourraient nécessiter des ajustements afin de tenir compte de la variété locale et/ou des conditions environnementales locales.

Quand une culture n'est pas disponible dans la base de données, un fichier de culture peut être créé en spécifiant seulement le type de culture (culture fruitières/céréalières ; culture de racine ou tubercule ; légumineuse ou culture fourragère) et la durée de son cycle de croissance. A partir de ces informations, AquaCrop fournira des valeurs par défaut ou des échantillons de valeur pour tous les paramètres requis. En absence d'information plus spécifique, ces valeurs peuvent être utilisées. A travers l'interface utilisateur, les valeurs par défaut peuvent être ajustées.

1.3.3 Caractéristiques du sol

Le profil de sol peut comprendre jusqu'à cinq horizons différents de profondeur variable, ayant chacun ses propres caractéristiques physiques. Les caractéristiques hydrauliques considérées sont : la conductivité hydraulique à saturation (K_{sat}), les teneurs en eau du sol à saturation (θ_{sat}), à la capacité de champ (θ_{FC}) et au point de flétrissement permanent (θ_{PWP}). L'utilisateur peut se servir des valeurs indicatives fournies par AquaCrop pour divers classes de texture de sol, ou peut importer des données localement déterminées ou encore déterminer les données à partir des textures de sol avec l'aide des fonctions de pédotransfert. Quand une couche bloque l'expansion de la zone racinaire, sa profondeur dans le profil de sol doit également être spécifiée.

1.3.4 Pratiques de gestion

Les pratiques de gestion sont divisées en deux catégories : gestion de la parcelle, et gestion des pratiques d'irrigation :

- Les pratiques de gestion à la parcelle qui peuvent être choisies sont : des niveaux de fertilité du sol et les pratiques affectant le bilan d'eau du sol comme : l'application des paillis pour réduire l'évaporation du sol, des diguettes pour stocker l'eau sur la parcelle, et les pratiques de labour comme le billonnage ou la création des contours afin de réduire les ruissellements d'eau de pluie. Les niveaux de fertilité varient de non-limité à pauvre, et affectent la WP, la croissance de la canopée, la couverture maximale de la canopée et la sénescence ;
- Quant à la gestion d'irrigation, l'utilisateur peut choisir entre culture pluviale et culture irriguée. En cas d'irrigation, l'utilisateur peut choisir la méthode d'irrigation (aspersion, goutte-à-goutte ou gravitaire), la fraction de la surface mouillée, et spécifier pour chaque irrigation, la qualité d'eau, la durée et la dose appliquée. Il y a également des options pour estimer les besoins nets en irrigation, et pour générer des calendriers d'irrigation, basés sur des critères de temps et de profondeur spécifiés. Comme les critères peuvent changer durant la saison, le programme offre la possibilité d'essayer des stratégies d'irrigation déficitaire en appliquant différents doses d'eau durant les divers stades du développement de la culture.

1.4 Applications

AquaCrop peut être utilisé comme outil de planification ou d'aide à la décision pour l'agriculture irriguée et pluviale. Le modèle est particulièrement utile :

- pour développer des stratégies d'irrigation dans des conditions de déficit en eau ;
- pour étudier l'effet sur le rendement de l'emplacement, du type de sol, de la date de semis, ...;
- pour étudier l'effet de différentes techniques de gestion des terres sur le rendement ;
- pour comparer le rendement réel et optimal sur une parcelle, un périmètre ou une région afin d'identifier les contraintes limitant la production de la culture et la productivité de l'eau ;
- pour prédire les impacts du changement climatique sur la production agricole ;
- pour des simulations de scénarii et pour la planification par des économistes, les administrateurs et gestionnaires de l'eau.

Références

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D and Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Irrigation and Drainage Paper 56. FAO, Rome, Italy, 300 pp.
- Doorenbos, J. and Kassam, A.H., 1979. Yield response to water. Irrigation and Drainage Paper 33. FAO, Rome, Italy, 193 pp.
- Hsiao, T.C., Heng, L., Steduto, P., Rojas-Lara, B., Raes, D., and Fereres, E., 2009. AquaCrop: The FAO crop model to simulate yield response to water: III. Parameterization and testing for maize. *Agronomy Journal*, 101(3), 448-459.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C., and Fereres, E., 2009. AquaCrop: The FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description. *Agronomy Journal*, 101(3), 438-447.
- Steduto, P., Hsiao, T.C. and Fereres, E., 2007. On the conservative behavior of biomass water productivity. *Irrigation Science*, 25, 189-207.
- Steduto, P., Hsiao, T.C., Raes, D., and Fereres, E., 2009. AquaCrop: The FAO crop model to simulate yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy Journal*, 101(3), 426-437.

2 AquaCrop : manuel d'utilisation

2.1 L'environnement d'AquaCrop

AquaCrop est un programme piloté par des menus avec une interface utilisateur très intuitive. Les fenêtres (couche de menus) sont des interfaces entre l'utilisateur et le programme. De multiples graphiques et présentations schématiques dans les menus aident l'utilisateur à discerner les conséquences des changements des données d'entrée et à analyser les résultats des simulations.

Du **Menu Principal** (*main menu*), l'utilisateur a accès à un ensemble de menus où les données d'entrée sont affichées et peuvent être mises à jour. Les données d'entrée consistent en des données météorologiques, de culture, d'irrigation et de gestion de la parcelle, des caractéristiques du sol et des eaux souterraines qui définissent l'environnement dans lequel la culture va se développer. Le jour du semis ou de plantation, la période de simulation et ses conditions initiales sont aussi saisis. Si la période de simulation ne coïncide pas entièrement avec le cycle cultural, des conditions hors-saison peuvent être spécifiées en dehors de la période de croissance végétale et être utilisées comme données d'entrée.

Avant de lancer une simulation, l'utilisateur spécifie dans le **Menu Principal** (*main menu*), la date de semis, la période de simulation et les conditions environnementales, initiales et hors-saison appropriées. Les données d'entrée peuvent être récupérées à partir de fichiers de données d'entrée. Dans le cas d'absence de fichiers de données d'entrée, des paramètres par défaut sont considérés (voir 2.3 : Paramètres par défaut au démarrage). L'utilisateur peut aussi sélectionner un fichier de projet contenant toutes les informations requises pour cette simulation, ainsi qu'un fichier d'informations contenant des mesures de terrain pour évaluer les résultats de simulation.

En exécutant une simulation, l'utilisateur peut suivre à travers le menu **Simulation** (*simulation run*) les changements des teneurs en eau et en sel du sol, les changements correspondants dans le développement de la culture, l'évaporation du sol, le taux de transpiration, la production de biomasse, le rendement et la productivité de l'eau. Les résultats de simulation sont stockés dans des fichiers de sortie et peuvent être consultés avec des tableurs pour traitement et analyse.

Les paramètres de configuration du programme permettent à l'utilisateur de sélectionner les procédures de calcul ou de changer les paramètres par défaut d'AquaCrop. Avec la commande **<Reset>** dans le menu **Paramètres de Configuration du Programme** (*program settings*), les paramètres par défaut peuvent être restaurés.

2.2 Menu principal

Le *Menu Principal* (*main menu*) est constitué de 3 fenêtres où les noms et descriptions des fichiers d'entrée sélectionnés sont affichés (Figure 2.2):

A. Fenêtre Environnement et Culture: où l'utilisateur :

- 1) sélectionne ou crée les fichiers suivants : **Climat** (Température, ET_o, Pluie, CO₂), **Culture**, **Gestion** (de l'irrigation et de la parcelle), **Profil de sol** et **Eau souterraine**, et met à jour les données correspondantes ;
- 2) spécifie le début du cycle de croissance ;

B. Fenêtre de Simulation: où l'utilisateur :

- 3) spécifie: (i) la période de simulation, (ii) les conditions initiales pour la simulation, et (iii) les conditions hors-saison lorsque la période de la simulation dépasse celle du cycle de croissance ;
- 4) démarre une simulation pour l'environnement, la période et les conditions spécifiés.

C. Fenêtre de Projet et d'Observations de terrain : où les projets et les observations collectées sur le terrain peuvent être sélectionnés, créés ou mis à jour.

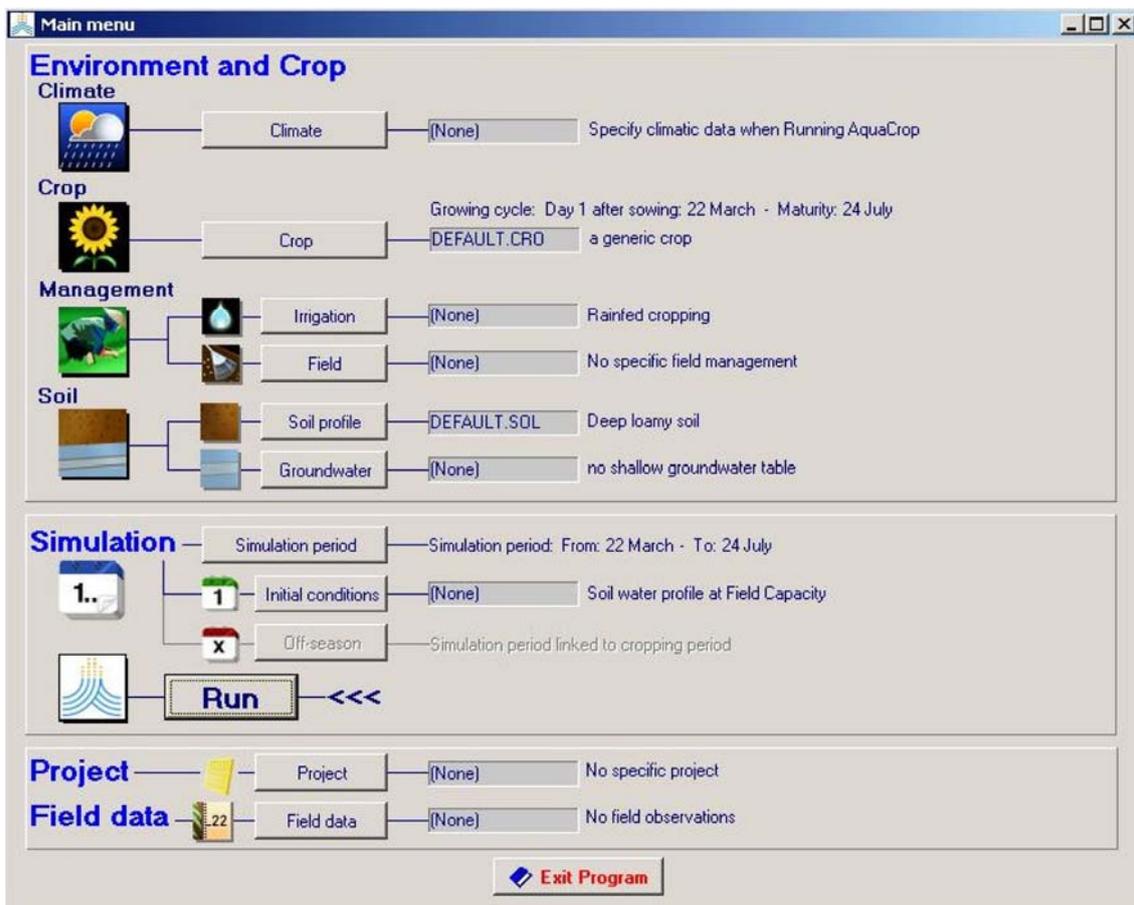


Figure 2.2 - *Menu Principal* (*main menu*) d'AquaCrop

2.3 Paramètres par défaut au démarrage

2.3.1 Données d'entrée sélectionnées

Quand AquaCrop démarre, il sélectionne les fichiers de culture et de sol par défaut. Aucun autre fichier ('None') n'est choisi. En cas d'absence d'information sur le climat, la gestion de l'irrigation, la gestion de la parcelle, l'eau souterraine, les conditions initiales et hors-saison, les paramètres par défaut sont considérés (Tab. 2.3).

Tableau 2.3 - Paramètres par défaut considérés au démarrage d'AquaCrop ou après annulation de la sélection d'un projet

Environnement	Fichier	Remarques
Climat	Aucun	Par défaut, une température minimale et maximale d'air (voir Climat), une ET ₀ de 5 mm/jour, aucune pluviométrie et une concentration moyenne de CO ₂ dans l'atmosphère de 369.47 ppm sont considérés tout au long du cycle de croissance. En simulant sans fichier climatique, l'utilisateur a toujours l'option de spécifier d'autres données que celles par défaut de l'ET ₀ et de la pluviométrie. Ces données climatiques peuvent être spécifiées pour chaque jour de la période de simulation dans l'onglet des données d'entrée du menu <i>Simulation (Simulation run)</i> .
Culture	Défaut	Données génériques de culture
Gestion d'irrigation	Aucun	La culture pluviale est considérée. En simulant dans ce mode, l'irrigation peut toujours être programmée. La qualité et la quantité d'eau d'irrigation peuvent être spécifiées pour chaque jour de la période de simulation dans la fenêtre d'entrée du menu <i>Simulation (Simulation run)</i> .
Gestion de la parcelle	Aucun	Aucune condition spécifique de gestion de terrain n'est considérée. On suppose que la fertilité du sol est illimitée et que les pratiques agricoles des parcelles n'affectent ni l'évaporation du sol ni les ruissellements.
Sol	Défaut	Sol profond et limoneux.
Eau souterraine	Aucun	Absence de nappe d'eau souterraine peu profonde.
Simulation	Fichier	Remarques
Période		La période de simulation couvre complètement le cycle de croissance.
Conditions initiales	Aucun	Au début de la simulation on considère que, dans le profil du sol, (i) la teneur en eau est à la capacité au champ et (ii) ne contient pas de sels.
Conditions hors-saison	Aucun	On ne considère aucune condition spécifique de gestion de parcelle en dehors de la période du cycle de croissance. Lors d'une simulation de cette phase, il n'y a pas d'irrigation et aucun mulch ne couvre le sol.
Projet ; Terrain	Fichier	Remarques
Projet	Aucun	
Observations de terrain	Aucun	

Les données d'entrée par défaut peuvent être changées en sélectionnant les fichiers d'entrée (voir 2.4), en mettant à jour les paramètres par défaut dans les menus correspondants, ou en changeant les caractéristiques extraites des fichiers d'entrée (voir 2.5), ou en créant des fichiers d'entrée (voir 2.6).

2.4 Sélection des données d'entrée et annulation de la sélection

Par le biais des commandes <Select/Create> du *Menu Principal* (*main menu*), l'utilisateur a accès aux bases de données où les fichiers des données d'entrée sont stockés (Fig. 2.4). La base de données par défaut est le sous-répertoire DATA dans le dossier d'AquaCrop. A l'aide de la commande <Path> l'utilisateur peut spécifier d'autres répertoires.

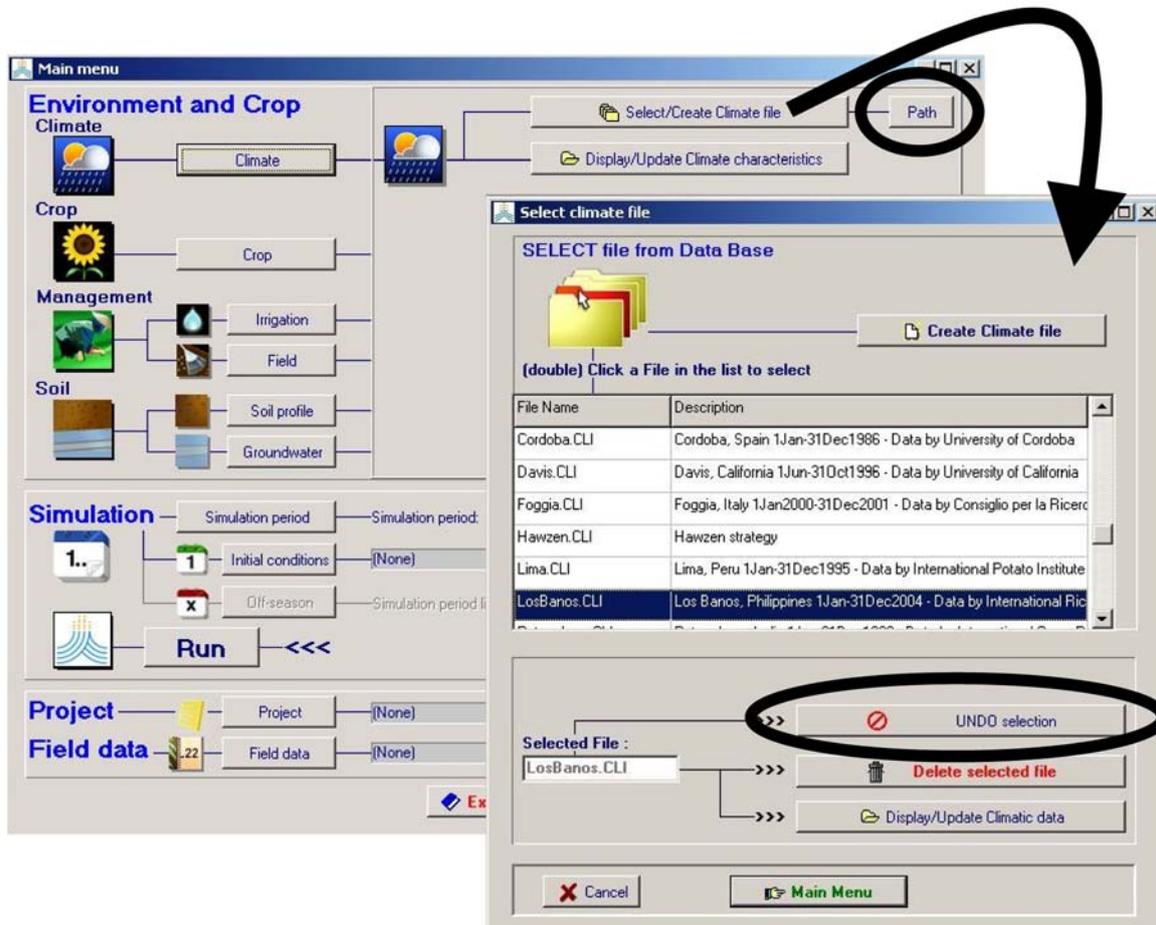


Figure 2.4 - Accès à la *Sélection du fichier climat* (*select climate file*) où les fichiers de données d'entrée peuvent être choisis dans la base de données, et où la sélection peut être annulée avec la commande <UNDO selection>

2.4.1 Sélectionner un fichier

En cliquant sur la commande <Sélectionner> (*select*) du *Menu Principal* (*main menu*), une liste des fichiers de données d'entrée disponibles dans le répertoire choisi est affichée dans un des menus de la fenêtre *Sélectionner un fichier* (*select file*) (Fig. 2.4). Un fichier d'entrée est choisi en cliquant sur son nom dans la liste.

2.4.2 Annuler la sélection

Lorsque le climat, l'irrigation, la gestion de la parcelle, l'eau souterraine, les conditions initiales, les conditions hors-saison, les données de terrain, ou un fichier de projet a été sélectionné, une option est disponible pour annuler la sélection et retourner aux paramètres par défaut (voir 2.3). Cela se fait en cliquant sur la commande <UNDO selection> dans le menu de la fenêtre *Sélectionner un fichier* (*select file*) (Fig. 2.4).

2.5 Affichage et mise à jour des caractéristiques des données d'entrée

2.5.1 Affichage des données d'entrée

Du *Menu Principal* (*main menu*) l'utilisateur a accès à un ensemble de menus où les données d'entrée sont affichées (Fig. 2.5a). Il le fait en cliquant sur le nom du fichier ou l'icône correspondante dans le *Menu Principal*.

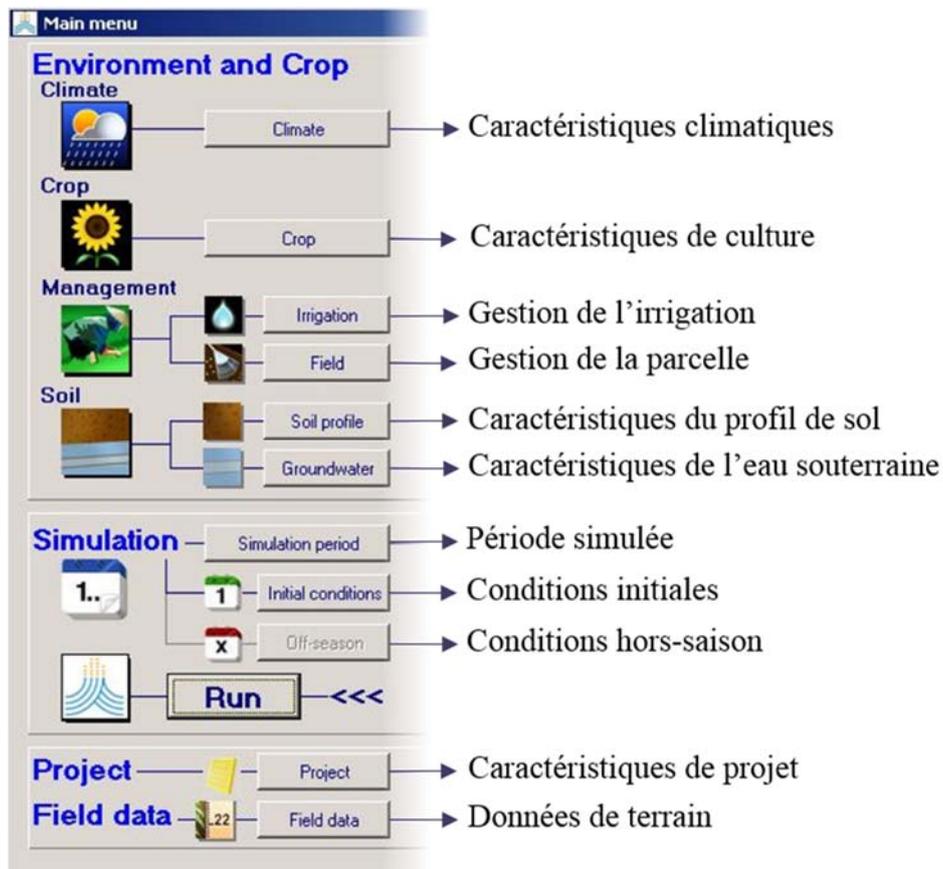


Figure 2.5a - En cliquant sur les icônes (ou des noms de fichier) dans le *Menu Principal* (*main menu*) les données d'entrée sont affichées dans un ensemble de menus d'affichage

2.5.2 Mise à jour des données d'entrée

Du *Menu Principal* (*main menu*) l'utilisateur a accès à une série de menus où les données d'entrée peuvent être mises à jour (Fig. 2.5b). Il le fait en ouvrant d'abord l'accès à la base de données (clic sur la commande appropriée dans le *Menu Principal* et en choisissant par la suite la commande <Affichage/Mise à jour des caractéristiques> (*display/update characteristics*). Dans les menus, les données peuvent être mises à jour et enregistrées comme des paramètres par défaut ou dans des fichiers de données d'entrée en retournant au *Menu Principal* (voir 2.7 pour quitter et fermer un menu). Les différents menus *Afficher/Mettre à jour* (*display/update*) sont décrits dans les sections 2.8 à 2.20.

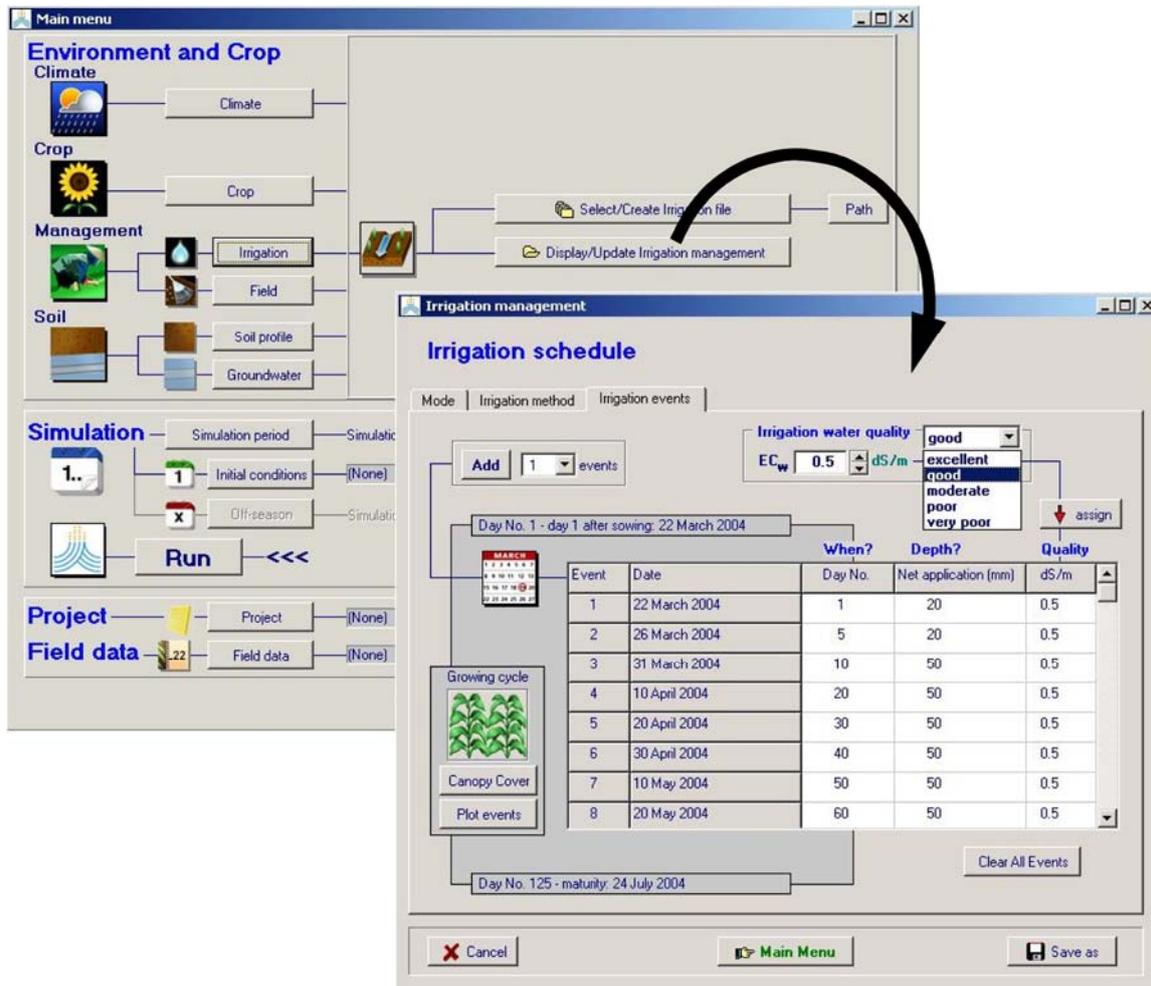


Figure 2.5b - Accès au menu *Gestion de l'Irrigation* (*irrigation management*) où les données d'entrée affichées peuvent être mises à jour

2.6 Création des fichiers de données d'entrée

2.6.1 Enregistrer

Après la mise à jour des caractéristiques dans l'un des menus (voir 2.5.2), un fichier de données d'entrée est créé (s'il n'était pas encore disponible) en sélectionnant la commande <**Save on disk**> (*enregistrer*) (Fig. 2.6a).

2.6.2 Enregistrer sous

Si les données affichées dans le menu caractéristique ont été tirées d'un fichier de données d'entrée (Fig. 2.5b), une copie du fichier sera créée en cliquant sur la commande <**Save as**> (*enregistrer sous*). Cette option permet à l'utilisateur de créer des copies diverses d'une série de données qui peuvent différer seulement pour un paramètre particulier. Ceci pourrait être utile pour l'analyse de l'un ou l'autre effet sur le développement de la culture ou sur la productivité de l'eau.

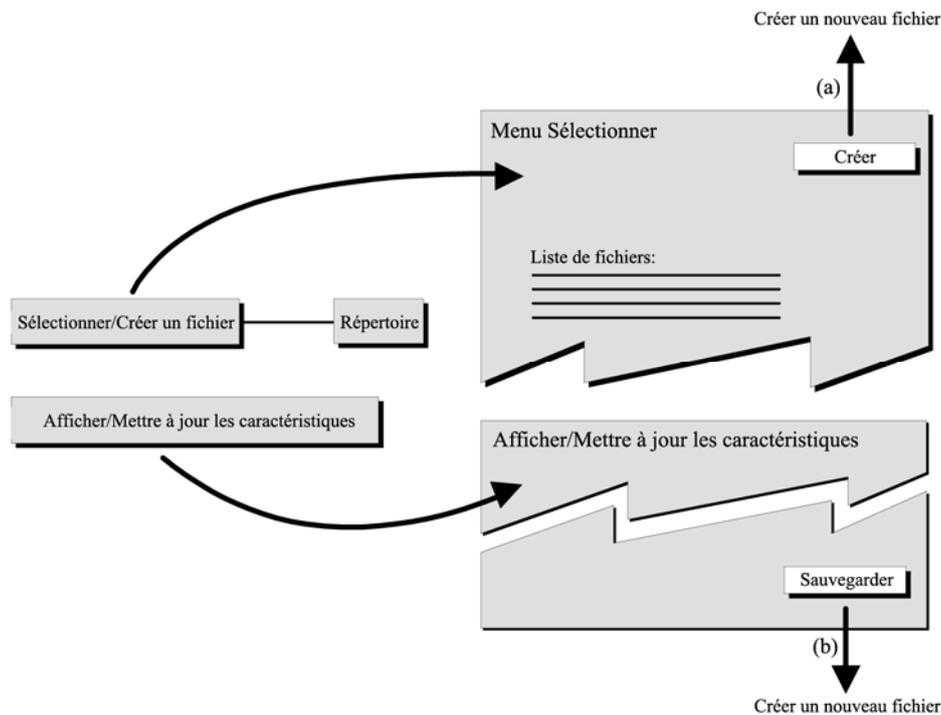


Figure 2.6a - Options disponibles pour créer des fichiers de données d'entrée par le biais de l'interface utilisateur

2.6.3 Créer un fichier

Les menus **Créer un fichier** (*create file*) créent un nouveau fichier climat, culture, gestion d'irrigation, profil du sol, eau souterraine, données de terrain ou données de projet. Les menus **Créer un fichier** deviennent disponibles en sélectionnant la commande <**Créer un fichier**> dans le menu **Sélectionner un fichier** (*select file*) (Fig. 2.6a).

- **Créer un fichier climat**

La création d'un fichier climat consiste en la sélection ou en la création d'un fichier Température, ET_o, Précipitation et CO₂ (Fig. 2.6b)

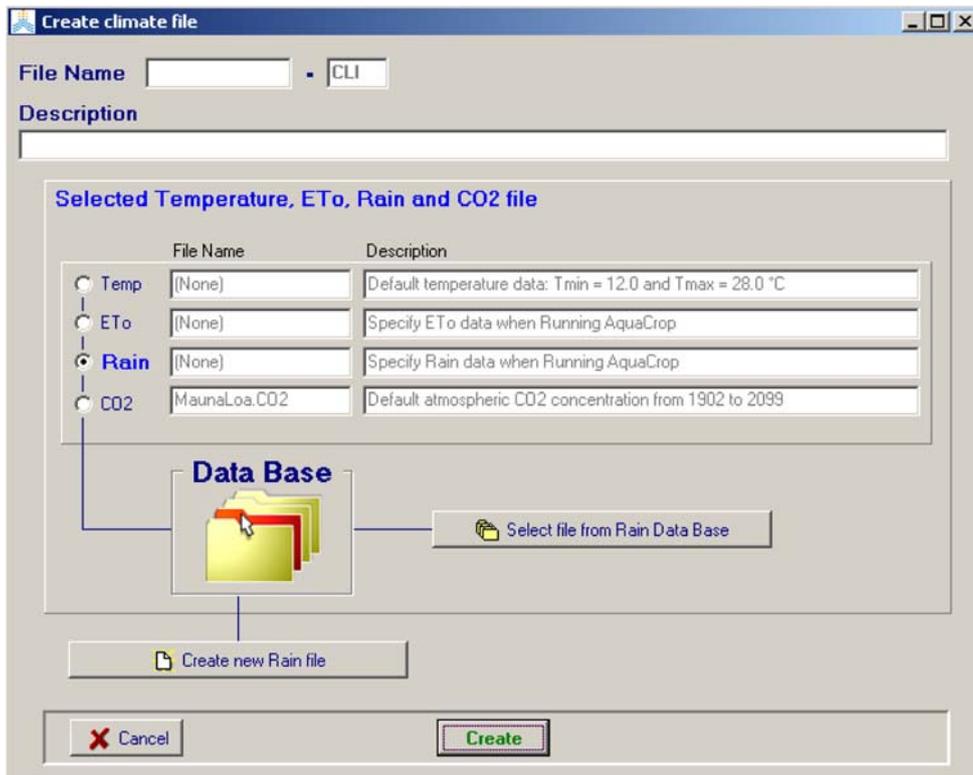


Figure 2.6b - Menu *Créer un fichier climat (create climate file)*

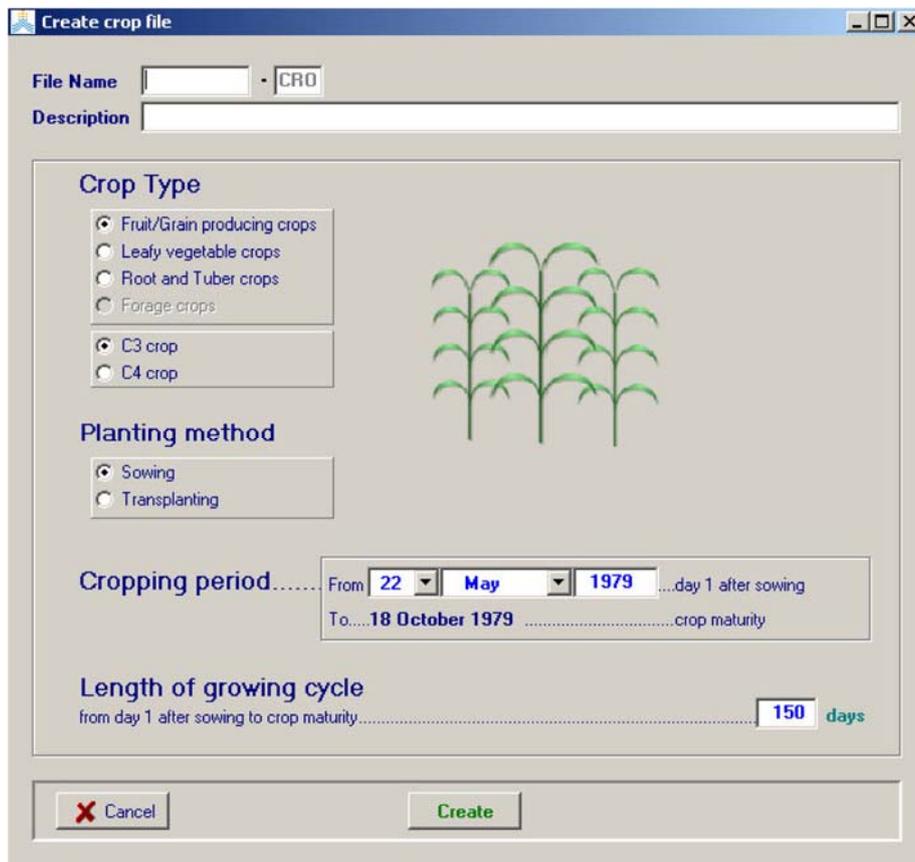


Figure 2.6c -Menu *Créer un fichier culture (create crop file)*

- **Créer un fichier d'ET_o, de Pluie ou de Température**

En créant un fichier d'ET_o, de Pluie ou de Température, l'utilisateur doit spécifier le type de données (journalier, décadaire ou mensuel), la gamme de temps et les données. Des données climatiques existantes peuvent aussi être collées dans le fichier d'ET_o, de Pluie ou de Température, tant que la structure du fichier est respectée (voir 2.21.2 fichiers Température, ET_o et Pluviométrie).

- **Créer un fichier culture**

En créant un fichier culture, l'utilisateur sélectionne le type de cultures (culture fruitière, céréalière, légumes verts, culture racinaire et tubercule ou culture fourragère), et spécifie quelques paramètres (Fig. 2.6c). A l'aide de cette information, AquaCrop génère une série complète de paramètres de culture. Les paramètres sont affichés et les valeurs peuvent être ajustées dans le menu *Caractéristiques culturales* (*crop characteristics*) (voir 2.9).

- **Créer un fichier irrigation**

En créant un fichier irrigation, le type de fichier doit d'abord être sélectionné:

1. Besoin net en irrigation;
2. Calendrier d'irrigation; ou
3. Génération d'un calendrier d'irrigation.

En conséquence, l'utilisateur spécifie les informations exigées:

1. L'épuisement permis en déterminant le besoin net en irrigation;
2. Le moment, la quantité appliquée et la qualité de l'eau d'irrigations successives; ou
3. La qualité de l'eau, le moment et les quantités appliquées pour générer des irrigations.

- **Créer un fichier profil de sol**

En créant un fichier profil de sol, l'utilisateur doit spécifier seulement quelques caractéristiques (Fig. 2.6d). A l'aide de ces informations, AquaCrop produit un ensemble complet de paramètres de profil de sol. Les paramètres sont affichés, et les valeurs peuvent être ajustées dans le menu *Caractéristiques de profil de sol* (*soil profile characteristics*) (voir 2.13).

- **Créer un fichier eaux souterraines**

En créant un fichier eaux souterraines, le type de fichier doit d'abord être sélectionné:

1. Profondeur et qualité de l'eau constantes; ou
2. Profondeur et/ou qualité de l'eau variables.

Par la suite, l'utilisateur spécifie les informations sur la profondeur et la qualité de l'eau souterraine pour diverses périodes (si variable) de la saison dans le menu *Caractéristiques de l'eau souterraine* (*groundwater characteristics*) (voir 2.14).

- **Créer un fichier projet**

En créant un fichier projet, le type de fichier doit d'abord être choisi (Fig. 2.18b):

1. Simulation unique;
2. Années successives (simulations multiples) ; ou
3. Rotation des cultures (simulations multiples).

Après, l'utilisateur spécifie les fichiers climat, de(s) culture(s), d'irrigation et de la gestion de la parcelle, de sol, et choisit la(es) date(s) de semis ou de plantation, la période de simulation, et les conditions initiales ou hors-saison (voir 2.18.2 Choisir et créer un projet). Les caractéristiques peuvent être mises à jour dans le menu *Caractéristiques de projet* (*project characteristics*) (voir 2.18.3 Mettre à jour des caractéristiques de projet).

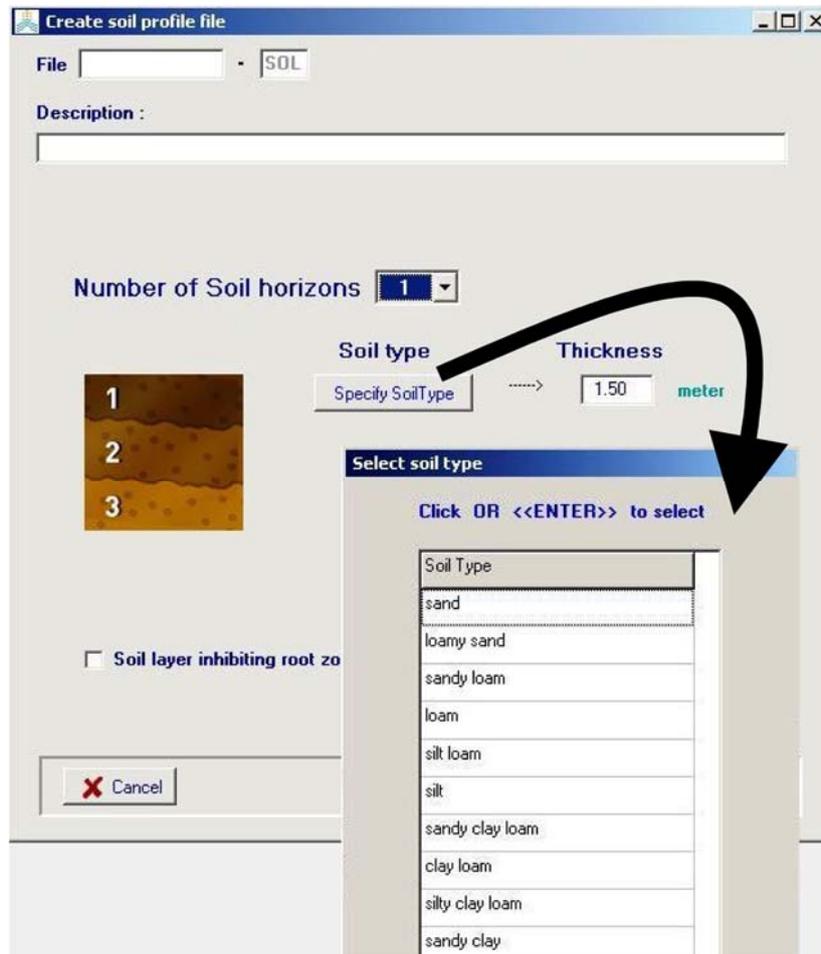


Figure 2.6d - Menu *Créer le profil de sol (create soil profile)*

- **Créer un fichier données de terrain**

En créant un fichier données d'observations de terrain, l'utilisateur doit spécifier dans le menu ***Données de terrain (field data)*** la couverture de la canopée verte (CC), et/ou la biomasse sèche au-dessus du sol (B), et/ou la teneur en eau du sol (SWC) observées sur le terrain à des dates spécifiques (voir 2.19).

2.7 Quitter et fermer un menu

Les commandes pour quitter un menu sont disponibles dans la fenêtre de configuration en bas de chaque menu (Fig. 2.7). En quittant, la fenêtre sera fermée et l'interface reviendra au **Menu Principal** (*main menu*). Le mode de sortie est fonction de la commande sélectionnée. Les options suivantes pour quitter un menu sont généralement disponibles :

- <**Annuler**> (*cancel*) Tous les changements faits sur les données d'entrée affichées dans le menu ne sont pas pris en compte en retournant au **Menu Principal**;
- <**Retourner au Menu Principal**> (*return to main menu*) Avant de rentrer au **Menu Principal**, le programme vérifie si les données ont été changées ou les paramètres ont été changés dans le menu. Les changements seront enregistrés si l'utilisateur confirme l'enregistrement des changements;
- <**Enregistrer**> (*save on disk*) Quand les données n'ont pas été extraites d'un fichier de données d'entrée, mais consistent en une mise à jour des paramètres par défaut, l'utilisateur peut choisir cette option pour enregistrer les données sur le disque avant de retourner au **Menu Principal**;
- <**Enregistrer sous**> (*save as*) Quand les informations ont été tirées d'un fichier de données d'entrée, l'utilisateur peut choisir cette option pour sauvegarder les données dans un fichier différent de celui où les données ont été extraites avant de retourner au **Menu principal**.

En cliquant sur le symbole 'X' au coin droit supérieur d'un menu, la fenêtre se ferme aussi. On ne recommande cependant pas cette option puisque le mode de sortie ne peut pas être spécifié.

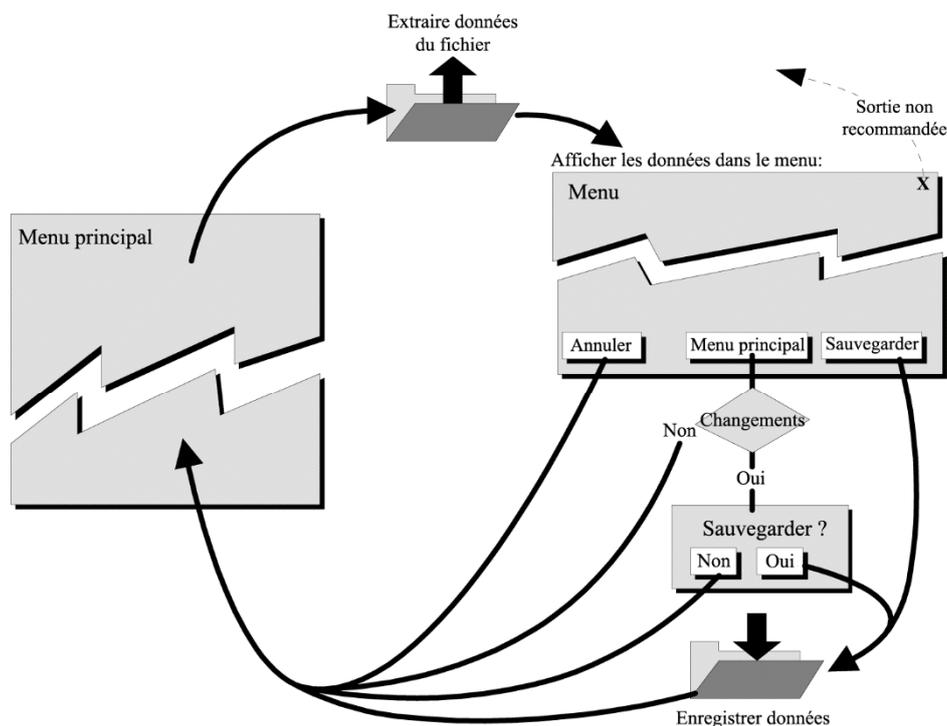


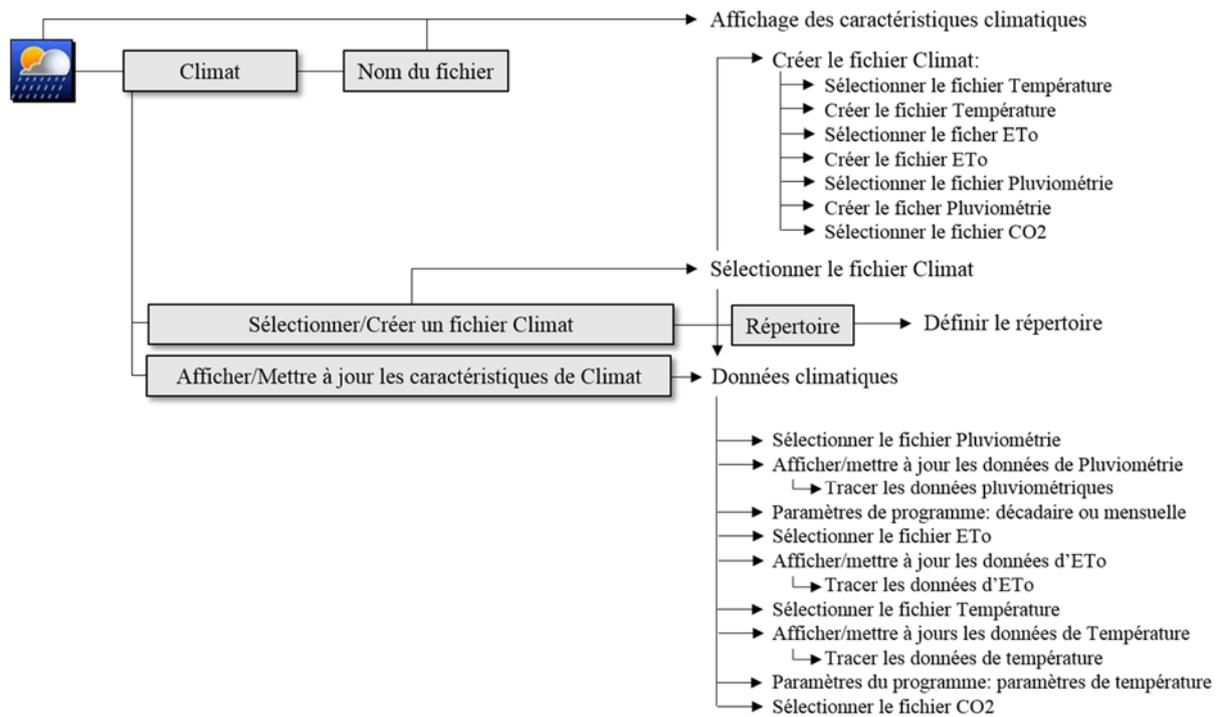
Figure 2.7 - Options pour quitter et fermer un menu

Structure hiérarchique des menus

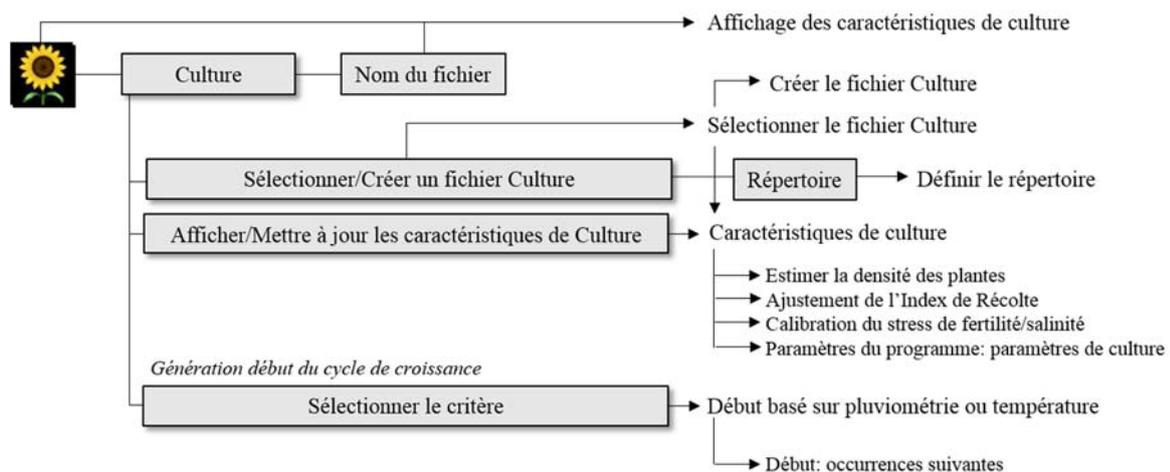
Menu principal

Onglet Environnement

- Climat

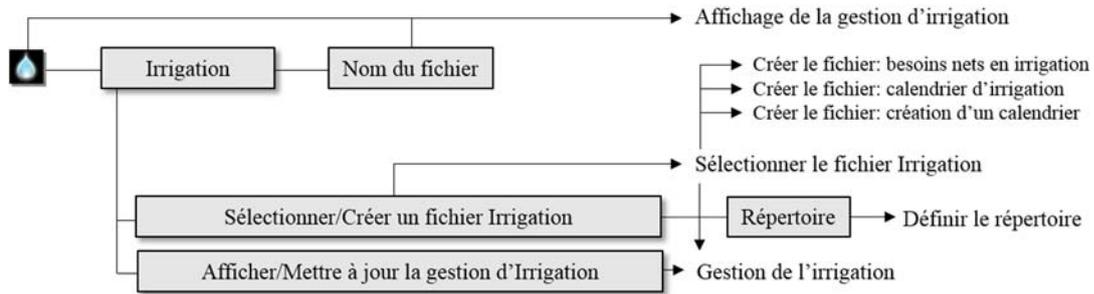


- Culture

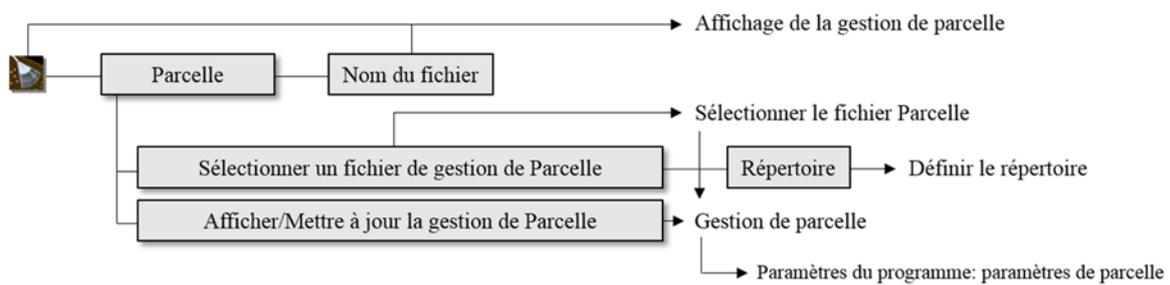


- **Gestion**

- Gestion de l'irrigation

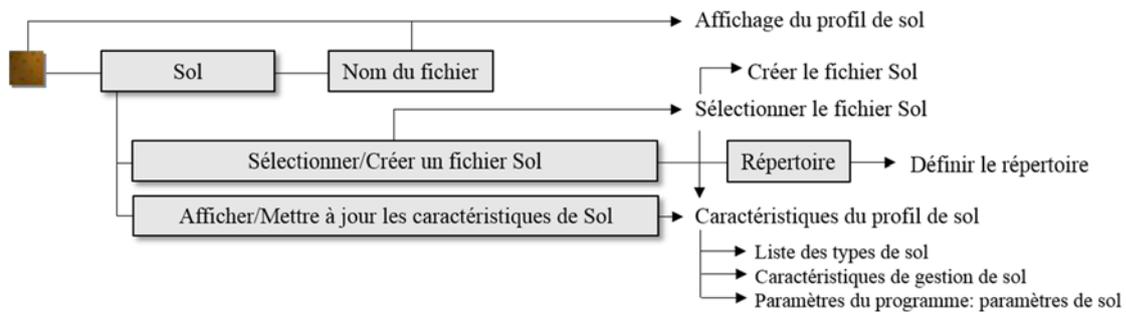


- Gestion de parcelle

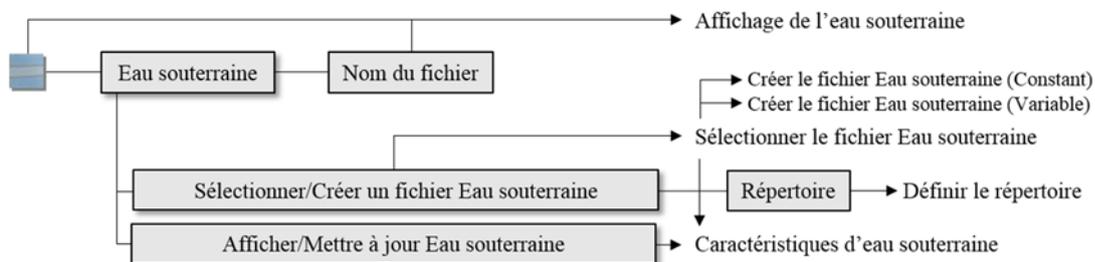


- **Sol**

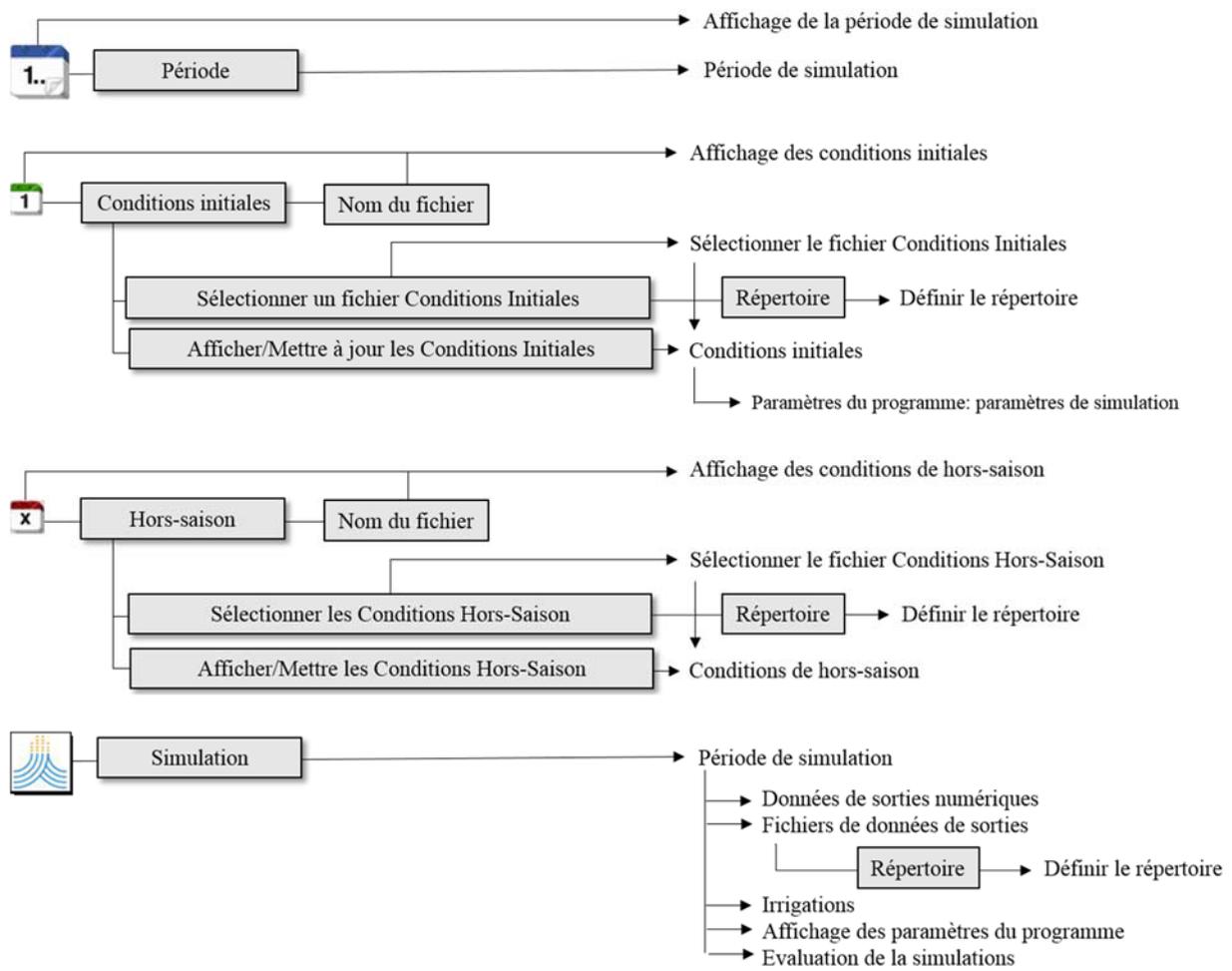
- Profil de sol



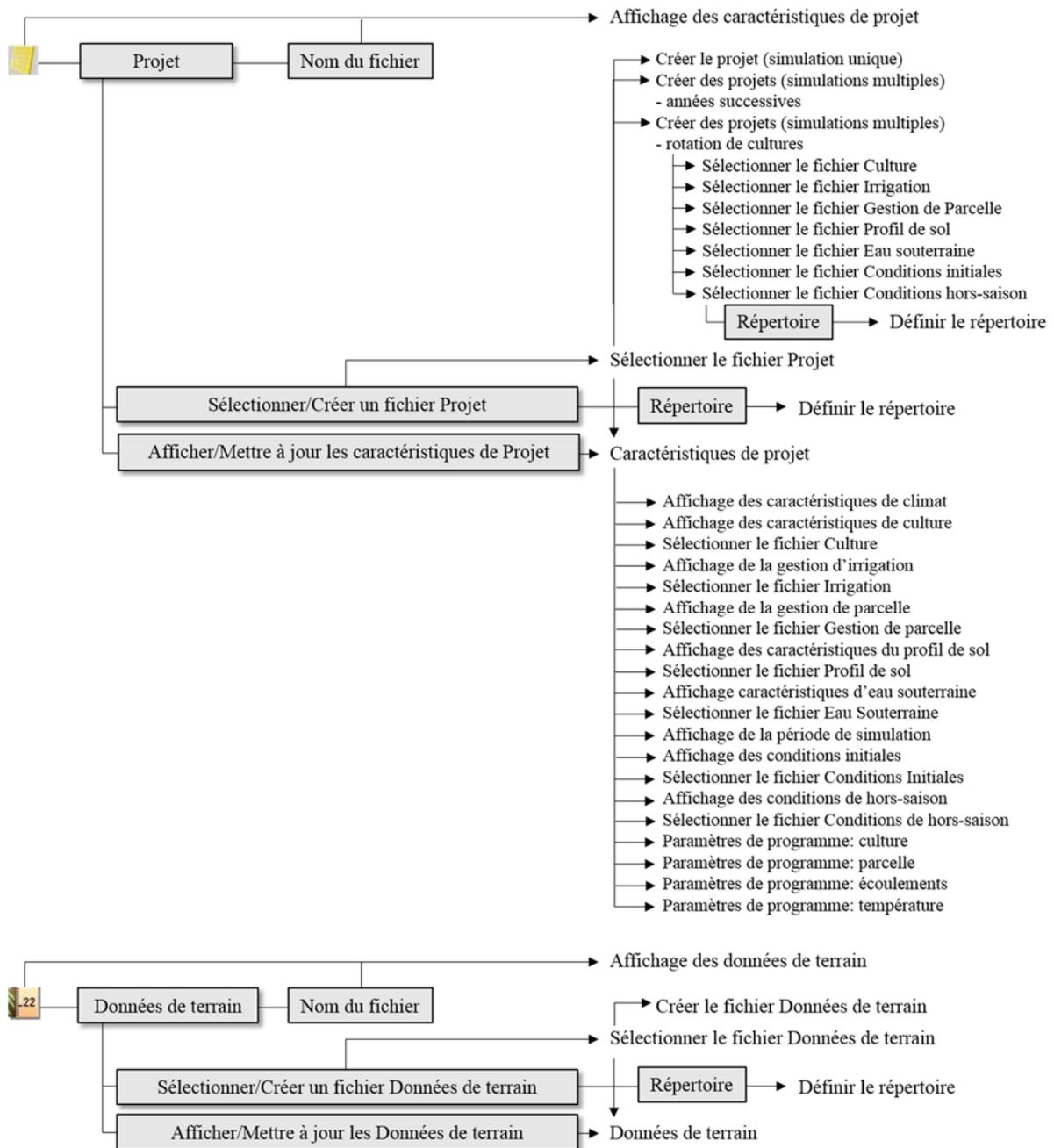
- Eau souterraine



Onglet Simulation



Onglet Projet / Données de terrain



2.8 Données climatiques

Pour chaque jour de la période de simulation, AquaCrop demande la température minimale et maximale de l'air, l'évapotranspiration de référence (ET_0), la pluviométrie et la moyenne annuelle de la concentration atmosphérique en CO_2 . Les données climatiques sont tirées des fichiers contenant des données journalières, décadaires ou mensuelles. Les données climatiques choisies peuvent être affichées dans le menu *Affichage des caractéristiques climatiques* (*display climate characteristics*) et mises à jour dans le menu *Données climatiques* (*climatic data*) (Fig. 2.8).

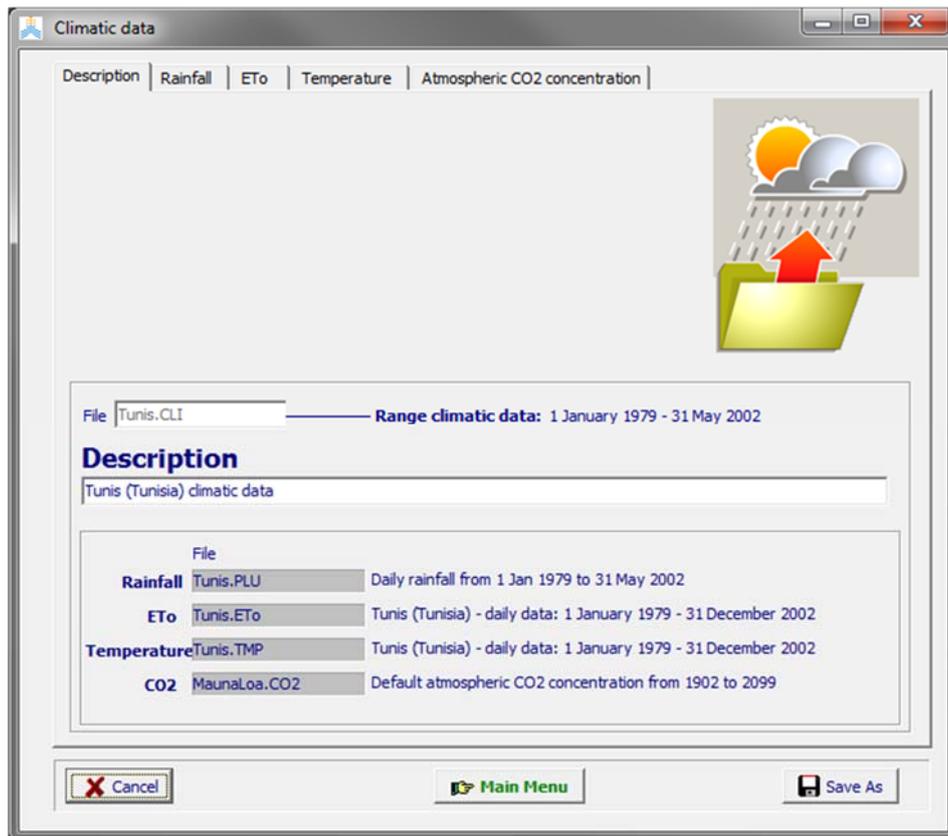


Figure 2.8 - Menu *Données climatiques* (*climatic data*)

2.8.1 Température minimale et maximale de l'air

Les données de température sont utilisées pour calculer les degrés jours de croissance qui déterminent le développement de la culture et la phénologie (voir 2.9.2), et aussi pour faire des ajustements de la production de biomasse pendant les périodes froides destructrices (voir 2.9.8). En absence de données journalières, les données d'entrée peuvent aussi consister en des données décadaires ou mensuelles, et le programme utilise une procédure d'interpolation pour obtenir la température journalière à partir des moyennes décadaires ou mensuelles.

La température minimale journalière de l'air (T_n) et la température maximale journalière de l'air (T_x), sont respectivement la température minimale et maximale de l'air observée pendant une période de 24h, commençant à minuit. T_n et T_x décadaires ou mensuelles sont les moyennes des valeurs journalières.

2.8.2 Evapotranspiration de référence (ET_o)

L'évapotranspiration de référence, nommée ET_o, est utilisée dans AquaCrop comme une mesure de la demande évaporatoire de l'atmosphère. C'est le taux d'évapotranspiration d'une surface de référence sans manque d'eau. La surface de référence retenue partout dans le monde est celle d'une large étendue de gazon uniforme (ou de la luzerne). La culture de référence couvre complètement le sol, est gardée courte, bien arrosée et grandit activement dans des conditions agronomiques optimales.

ET_o peut être calculée à partir des données de stations météorologiques, au moyen de l'équation de Penman-Monteith de FAO. Un calculateur d'ET_o est disponible dans ce but (Boîte 2.8). Dans le calculateur, les données d'une station météorologique peuvent être spécifiées dans une grande gamme d'unités, les données météorologiques peuvent être importées, des procédures sont disponibles pour estimer les valeurs climatiques manquantes, et l'ET_o calculée peut être exportée vers AquaCrop.

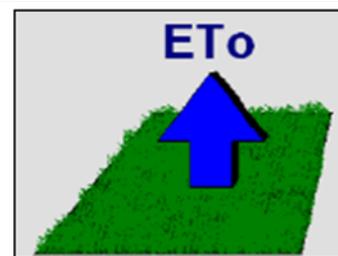
Box 2.8

Le calculateur d'ET_o (Land and water Digital Media Service N° 36, FAO, 2009).

Le calculateur ET_o est un logiciel du domaine public. Le fichier d'installation (1.5 Mb) et une version numérique du Manuel de Référence peuvent être obtenus auprès de:

Land and Water Development Division, FAO,
Viale delle Terme di Caracalla
00100 Rome, Italy
e-mail: Land-and-Water@fao.org
Fax: (+39)06 570 56275

web page: <http://www.fao.org/nr/water/ETo.html>



En absence de données journalières, le format de données d'entrée peut aussi consister en des données décadaires ou mensuelles, et le programme utilise une procédure d'interpolation pour obtenir journalièrement l'ET_o, à partir des moyennes décadaires ou mensuelles.

2.8.3 Pluviométrie

La pluviométrie est la quantité d'eau de pluie collectée dans des pluviomètres au champ ou enregistrée à une station météorologique proche. Pour la pluviométrie, avec sa distribution temporelle extrêmement hétérogène, on ne recommande pas l'utilisation de données moyennes à long terme. Dans le cas où aucune donnée pluviométrique journalière n'est disponible, des données décadaires et mensuelles peuvent être utilisées.

2.8.4 Moyenne annuelle de CO₂ atmosphérique

AquaCrop considère 369.47 parts volumiques par million (ppm) comme référence. C'est la moyenne de la concentration atmosphérique de CO₂ de l'année 2000 mesurée à l'Observatoire de Mauna Loa à Hawaï. D'autres concentrations de CO₂ affecteront l'expansion de la canopée et la productivité de l'eau de la culture (Chapitre 3). AquaCrop utilise par défaut les données de 'MaunaLoa.CO2' (stockées dans le sous-répertoire SIMUL) qui contiennent les moyennes de la concentration atmosphérique annuelle mesurées à l'Observatoire de Mauna Loa à Hawaï.

depuis 1958. Pour les données avant cette date, des résultats d'échantillons de névé et glace prélevés près de la côte antarctique¹ sont utilisés, et pour le futur, une augmentation annuelle de 2.0 ppm est estimée (communication personnelle de Pieter Hans (NOAA) Décembre 2007). D'autres fichiers CO₂ contenant des informations de sources alternatives peuvent être sélectionnés dans AquaCrop. En créant des fichiers CO₂, il est important de respecter la structure du fichier (voir 2.19.3).

2.8.5 Configuration du programme (*Program settings*)

A partir du menu *Données Climatiques (climatic data)*, l'utilisateur a accès aux paramètres de configuration du programme inscrits dans le tableau 2.8. Une distinction est faite pour la pluviométrie décadaire ou mensuelle et pour les paramètres de température

Tableau 2.8 - Paramètres de configuration du programme pour les paramètres de température et pour les procédures de simulation avec des données de pluviométrie décadaires ou mensuelles

Symbole	Paramètre du programme	Défaut
	<p><i>Paramètres de la température</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Méthode d'estimation des degrés jours de croissance (Chapitre 3) - Température de l'air minimale (T_n) et maximale (T_x), en cas d'absence de fichier température 	<p>Méthode 3 T_n = 12 °C T_x = 28 °C</p>
	<p><i>Pluviométrie décadaire ou mensuelle</i></p> <p>Procédures d'estimation de la pluie efficace, du ruissellement et de l'évaporation du sol quand les données pluviométriques sont des cumuls décadaires ou mensuelles (Chapitre 3)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Pluie efficace: procédure de calcul - Pluie efficace: pourcentage (fraction de pluie) - Ruissellement: averses par décade - Evaporation de sol : réduction 	<p>USDA-SCS 70 2 5</p>

¹ David Etheridge et al (1996), J. Geophys. Research vol. 101, 4115-4128

2.9 Caractéristiques culturelles

Les caractéristiques culturelles exigées par le programme peuvent être affichées dans le menu *Affichage des caractéristiques culturelles* (*display of crop characteristics*), et peuvent être mises à jour dans le menu *Caractéristiques culturelles* (*crop characteristics*) (Fig. 2.9a). Le nombre et le type de paramètres de culture varient légèrement avec les types de culture sélectionnés pendant la création d'un nouveau fichier culture dans AquaCrop (voir 2.6.3). La distinction est faite entre :

- Cultures fruitière/céréalière (avec une période de formation du rendement commençant à la floraison, durant laquelle l'Indice de Récolte s'accroît);
- Les légumes-feuilles (où l'information à la floraison n'est pas considérée et, où l'Indice de Récolte s'accroît à partir de la germination);
- Les cultures racinaires et à tubercules (avec une période de formation du rendement commençant à la formation du tubercule ou à l'expansion racinaire, durant laquelle l'Indice de Récolte s'accroît);
- Cultures fourragères (les cultures subissent plusieurs coupes par an, pouvant provoquer d'éventuelles altérations des caractéristiques culturelles).

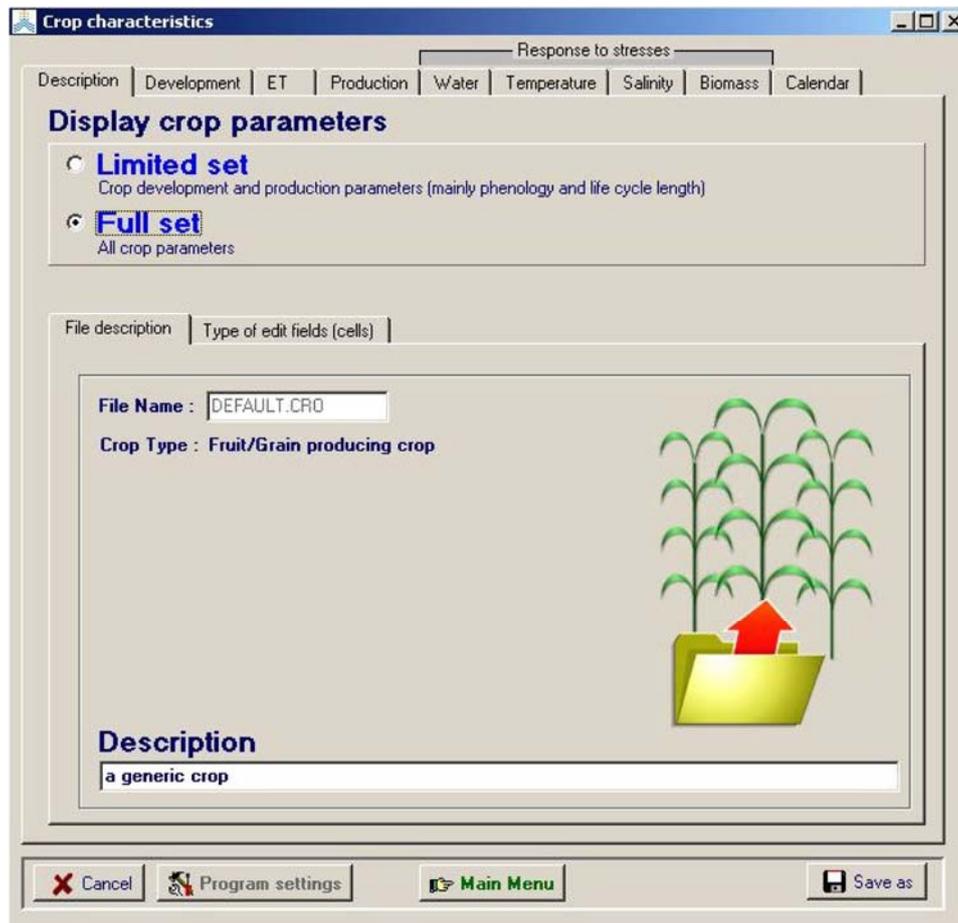


Figure 2.9a - Première page du menu *Caractéristiques culturelles* (*crop characteristics*) présentant les deux options pour le mode d'affichage

Les caractéristiques culturelles sont regroupées en 9 différents dossiers (onglets):

– **Description**

- Description du fichier
- Type de champs éditables (cellules)
- Fichiers Protégés (si applicable)

<ul style="list-style-type: none"> – Développement <ul style="list-style-type: none"> - Couverture initiale de la canopée - Développement de la canopée - Floraison et formation du rendement - Enracinement - Températures – ET <ul style="list-style-type: none"> - Coefficients - Modèle d'extraction de l'eau – Production <ul style="list-style-type: none"> - Productivité de l'eau de la culture - Indice de récolte – Stress hydrique <ul style="list-style-type: none"> - Expansion de la canopée - Fermeture stomatique - Sénescence précoce de la canopée - Stress d'aération - Indice de récolte <ul style="list-style-type: none"> - Avant floraison - Pendant floraison - Pendant formation du rendement - Vue d'ensemble – Stress de température <ul style="list-style-type: none"> - Production de Biomasse - Pollinisation – Stress de salinité – Biomasse - stress <ul style="list-style-type: none"> - Canopée - Productivité de l'eau - Transpiration - Biomasse - Relation biomasse - stress - Courbes Ks - Paramètres de Culture 	<p>7 Dossiers (onglets) affichant les caractéristiques culturelles</p>
--	--

– **Calendrier**

2.9.1 Description

• Présentation des modes d'affichage des paramètres de culture

Deux types d'affichage des paramètres cultureux peuvent être sélectionnés (Fig. 2.9a):

- **Limité** (*limited set*): les paramètres de culture décrivant principalement la phénologie et la longueur du cycle de la culture sont présentés. Ce sont:

Plantation
Méthode de plantation/semis (semis direct ou transplantation)
Taille de la canopée du jeune plant transplanté (cas de transplantation)
Phénologie (spécifique à la variété culturale)
Moment de floraison ou le début de formation du rendement
Durée du stade de floraison
Moment du début de sénescence de la canopée
Moment où la maturité est atteinte (c'est à dire la durée du cycle de culture)
Moment pour atteindre la canopée complète (seulement si le cycle de culture est exprimé en jours calendaires)
Gestion
Densité des plantes
Moment de l'émergence
Couverture maximale de la canopée (dépend de la densité des plantes et de la variété culturale)
Sol
Profondeur maximale d'enracinement
Temps pour atteindre la profondeur maximale d'enracinement
Sol et gestion
Réponse à la fertilité du sol et/ou stress de salinité du sol

Ces paramètres pourraient exiger un ajustement quand on choisit une variété culturale différente de celle considérée pour la calibration, ou quand il y a des conditions environnementales différentes des conditions considérées pour la calibration, ou lorsque la méthode de plantation est changée. Les paramètres présentés sont spécifiques à la variété culturale, ou pourraient être affectés par la gestion de la parcelle, des conditions du profil de sol, ou le climat (particulièrement quand on simule en mode jours calendaires).

- **Série complète** (*full set*): Tous les paramètres de culture sont présentés (Tab. 2.9a).

• Type de champs éditables (cellules)

Les paramètres de culture sont affichés dans des champs d'édition (cellules). La couleur des champs d'édition varient selon le type de paramètres. Les paramètres conservateurs (présentés en cellules couleur argentée) sont spécifiques à la culture, mais ne changent pas substantiellement avec le temps, les pratiques de gestion, l'emplacement géographique ou le climat. Il est aussi admis qu'ils ne changent pas avec les variétés culturales, à moins que cela n'ait été démontré ailleurs. Ils ont été calibrés pour des plantes cultivées dans des conditions favorables et non-limitantes, mais restent applicables en condition de stress à travers la modulation des fonctions de réponse aux stress. Les autres paramètres (présentés dans des cellules blanches) sont spécifiques à la variété culturale, ou moins conservateurs et affectés par le climat, la gestion de la parcelle ou les conditions du profil de sol. Les paramètres de culture sont listés dans le Tableau 2.9a.

- **Fichiers Protégés**

Les fichiers de culture qui accompagnent le logiciel AquaCrop contiennent des paramètres de culture qui sont calibrés et validés par la FAO. Quoique l'utilisateur puisse changer les paramètres de culture dans le menu *Caractéristiques culturales* (*crop characteristics*), les réajustements ne peuvent pas être enregistrés dans les fichiers protégés. Sélectionnez la commande **<Enregistrer sous>** (*save as*) pour enregistrer les paramètres de culture mis à jour dans un nouveau fichier culture.

Tableau 2.9a - Liste des paramètres de culture et leur type

1. Phénologie de la culture		
Symbole	Description	Type ^{(1), (2), (3), (4)}
1.1 Seuil de températures de l'air pour les degrés jours de croissance (DJC)		
T _{base}	Température de base (°C)	Conservateur ⁽¹⁾
T _{upper}	Température supérieure seuil (°C)	Conservateur ⁽¹⁾
1.2 Développement de la couverture de la canopée verte		
cc _o	Taille moyenne de la canopée du jeune plant à 90 % d'émergence, ou taille de la canopée du jeune plant transplanté (cm ²)	Conservateur ⁽²⁾ Gestion ⁽³⁾
	Nombre de plantes par hectare	Gestion ⁽³⁾
	Le temps du semis à l'émergence (jours ou DJC) ou le temps de reprise (cas de transplantation)	Gestion ⁽³⁾
CGC	Le coefficient de croissance de canopée (fraction par jour ou par degré jour de croissance)	Conservateur ⁽¹⁾
CC _x	Couverture maximale de la canopée (fraction de la couverture du sol)	Gestion ⁽³⁾
	Temps du semis au de début de la sénescence (jours ou DJC)	Variété culturale ⁽⁴⁾
CDC	Coefficient de déclin de la canopée (fraction par jour ou par degré jour de croissance)	Conservateur ⁽¹⁾
	Temps du semis à la maturité, c'est-à-dire, la longueur du cycle de culture (jours ou DJC)	Variété culturale ⁽⁴⁾
1.3 Floraison ou début de la formation du rendement		
	Temps du semis à la floraison, ou au début de la formation du rendement (jours ou DJC)	Variété culturale ⁽⁴⁾
	Durée du stade de floraison (jours ou DJC)	Variété culturale ⁽⁴⁾
	Détermination de la culture liée ou non à la floraison	Conservateur ⁽¹⁾
1.4 Développement de la zone racinaire		
Z _n	Profondeur effective minimale d'enracinement (m)	Gestion ⁽³⁾
Z _x	Profondeur effective maximale d'enracinement (m)	Gestion ⁽³⁾
	Facteur de forme décrivant l'expansion de la zone racinaire	Conservateur ⁽¹⁾

2. Transpiration de la culture		
$K_{C_{Tr,x}}$	Coefficient cultural lorsque la canopée est complète, mais avant la sénescence.	Conservateur ⁽¹⁾
$100 f_{age}$	Baisse du coefficient cultural (% de CC_x par jour) suite au vieillissement, à la carence en azote, etc.	Conservateur ⁽¹⁾
$S_{x,top}$	Extraction maximale d'eau des racines ($m^3 m^{-3} jour^{-1}$) au quart supérieur de la zone racinaire.	Conservateur ⁽¹⁾
$S_{x,bot}$	Extraction maximale d'eau des racines ($m^3 m^{-3} jour^{-1}$) au quart inférieur de la zone de racine	Conservateur ⁽¹⁾
	Effet de la couverture de la canopée sur la réduction de l'évaporation du sol en stade final (% de réduction de l'évaporation du sol)	Conservateur ⁽¹⁾

3. Production de Biomasse et formation de produit		
3.1 Productivité de l'eau d'une culture		
WP^*	Productivité de l'eau normalisée pour ET_o et CO_2 (gram/ m^2)	Conservateur ⁽¹⁾
f_{yield}	Coefficient de réduction décrivant l'effet des produits synthétisés durant la formation de produit, sur la productivité de l'eau normalisée	Conservateur ⁽¹⁾
	Performance de la culture sous concentration atmosphérique élevée en CO_2 (%)	Gestion ⁽³⁾ Variété culturale ⁽⁴⁾
3.2 Indice de récolte		
HI_o	Indice de récolte de référence (%)	Variété culturale ⁽⁴⁾
	Excès de fruits potentiels (%)	Conservateur ⁽²⁾
	Accroissement possible (%) de l'HI dû au stress hydrique avant la floraison	Conservateur ⁽¹⁾
	Coefficient décrivant l'impact positif de la croissance végétative restreinte durant la formation de produit sur l'HI	Conservateur ⁽¹⁾
	Coefficient décrivant l'impact négatif de la fermeture des stomates durant la formation des produits sur l'HI.	Conservateur ⁽¹⁾
	Accroissement maximal autorisé (%) de l'HI	Conservateur ⁽¹⁾

4. Stress		
4.1. Stress hydrique du sol		
p _{exp, lower}	Seuil d'épuisement de l'eau du sol pour l'expansion de la canopée – Seuil supérieur	Conservateur ⁽¹⁾
P _{exp, upper}	Seuil d'épuisement de l'eau du sol pour l'expansion de la canopée – Seuil inférieur	Conservateur ⁽¹⁾
	Facteur de la forme du coefficient de stress hydrique pour l'expansion de la canopée	Conservateur ⁽¹⁾
p _{sto}	Seuil d'épuisement de l'eau du sol pour le contrôle des stomates – Seuil supérieur	Conservateur ⁽¹⁾
	Facteur de forme du coefficient de stress hydrique pour le contrôle des stomates	Conservateur ⁽¹⁾
p _{sen}	Seuil d'épuisement de l'eau du sol pour la sénescence de la canopée – Seuil supérieur	Conservateur ⁽¹⁾
	Facteur de forme du coefficient de stress hydrique pour la sénescence de la canopée	Conservateur ⁽¹⁾
	Somme (ET _o) durant la période de stress à ne pas dépasser avant que la sénescence soit déclenchée	Conservateur ⁽¹⁾
p _{pol}	Seuil d'épuisement de l'eau du sol pour l'échec de la pollinisation – Seuil supérieur	Conservateur ⁽¹⁾
	Vol% au point anaérobie (en référence à la saturation)	Variété culturale ⁽⁴⁾ Environnement ⁽³⁾
4.2 Fertilité du sol / stress de salinité		
	Stress à la calibration (%)	Gestion ⁽³⁾
	Facteur de forme du coefficient de stress pour l'expansion de la canopée	Gestion ⁽³⁾
	Facteur de forme du coefficient de stress pour une couverture maximale de la canopée	Gestion ⁽³⁾
	Facteur de forme du coefficient de stress pour la productivité de l'eau de la culture	Gestion ⁽³⁾
	Facteur de forme pour la réponse au déclin de la couverture de la canopée par stress	Gestion ⁽³⁾
	Facteur de forme du coefficient de stress pour la fermeture de stomates	Gestion ⁽³⁾
4.3 Stress de la température de l'air		
	Température minimale de l'air au-dessous de laquelle la pollinisation commence à échouer (stress du froid) (°C)	Conservateur ⁽¹⁾
	Température maximale de l'air au-dessus de laquelle la pollinisation commence à échouer (stress de la chaleur) (°C)	Conservateur ⁽¹⁾
	Degrés jours de croissance minimums requis pour une pleine production de biomasse (°C.jour)	Conservateur ⁽¹⁾

4.4 Stress de salinité du sol		
ECe _n	Conductivité électrique de l'extrait de la pâte saturée de sol: seuil inférieur (au cours duquel le stress de salinité du sol commence à apparaître)	Conservateur ⁽¹⁾
ECe _x	Conductivité électrique de l'extrait de la pâte saturée de sol: seuil supérieur (au cours duquel le stress de salinité du sol a atteint son effet maximum)	Conservateur ⁽¹⁾
	Facteur de forme du coefficient de stress de salinité du sol	Conservateur ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Paramètre conservateur généralement applicable

⁽²⁾ Paramètre conservateur pour une espèce donnée mais qui peut ou pourrait être spécifique à la variété culturale

⁽³⁾ Dépendant de l'environnement et/ou de la gestion

⁽⁴⁾ Spécifique à la variété culturale

2.9.2 Développement

Dans la figure 2.9b1 le développement de la culture dans des conditions non-limitantes est dessiné pour des cultures fruitières/céréalières. Au lieu de LAI, AquaCrop utilise la couverture verte de la canopée (CC), qui est la fraction de la surface du sol couverte par la canopée verte. Le développement de la culture peut être spécifié en degrés jours de croissance (DJC) ou jours calendaires. Les paramètres du développement de la culture se regroupent en 5 dossiers:

- Couverture initiale de la canopée (à 90% de l'émergence);
- Développement de la canopée (expansion et déclin de la canopée);
- Floraison et formation du rendement (ou formation de racines/tubercules);
- Enfouissement des racines;
- Températures (requis pour le calcul des degrés jours de croissance)

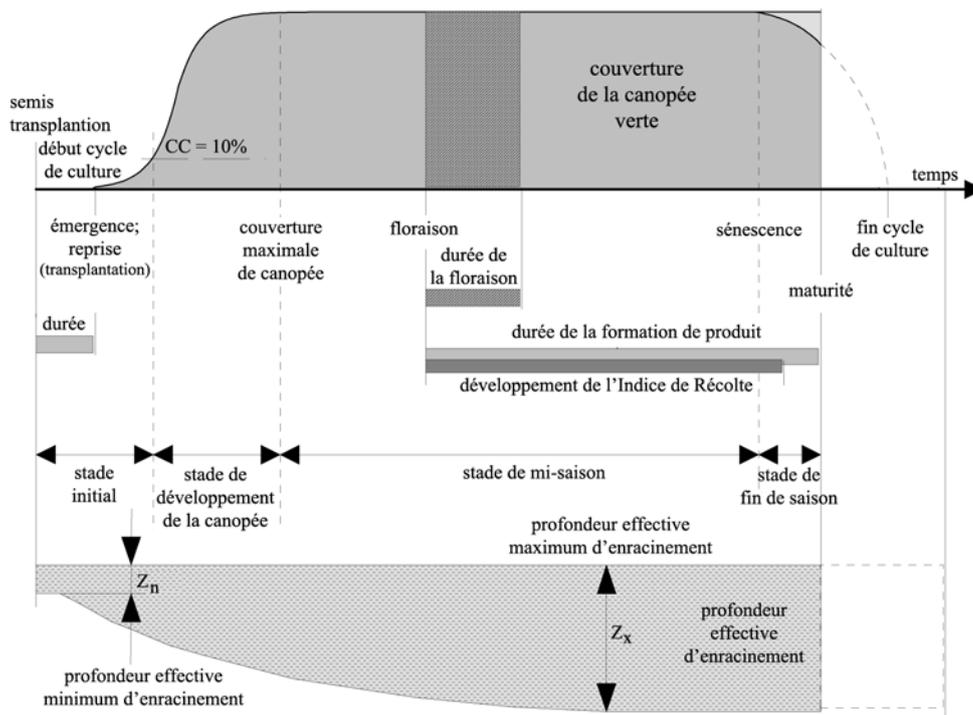


Figure 2.9b1 - Représentation schématique du développement de la culture pour des cultures fruitières/céréalières

- **Couverture initiale de la canopée**

La couverture initiale de la canopée (CC_0) est nécessaire pour décrire l'expansion de la canopée (Chapitre 3 – Section 3.3.2 Développement de la canopée). C'est le produit de la densité des plantes (nombre de plantes par hectare) et la taille de la canopée du jeune plant (cc_0).

Type de méthode de plantation

- Semis direct: CC_0 se réfère à la couverture initiale de la canopée à 90% de l'émergence, et s'obtient en multipliant la densité des plantes par la taille moyenne de la canopée du jeune plant à 90% d'émergence (cc_0);
- Transplantation: CC_0 se réfère à la couverture initiale de la canopée après transplantation, et s'obtient en multipliant la densité des plantes par la taille de la canopée du jeune plant transplanté (cc_0).

Puisque la taille de la canopée du jeune plant transplanté est probablement plus large que la taille de la canopée du jeune plant germinant, l'utilisateur devra confirmer ou ajuster la taille proposée par défaut, quand la méthode de plantation est changée (Fig. 2.9b2).

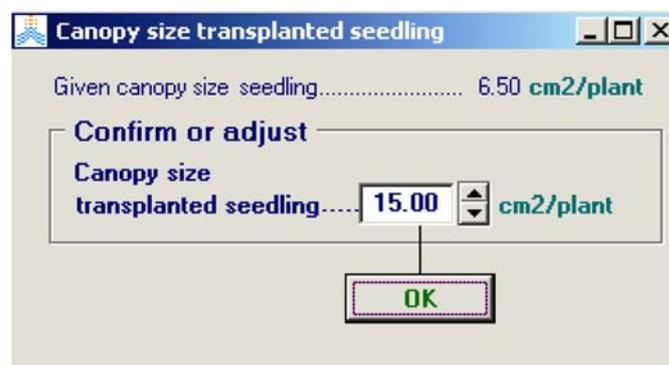


Figure 2.9b2 - Confirmation de la taille de la canopée du jeune plant transplanté quand la méthode de plantation est changée du semis direct à la transplantation, dans le menu *Taille de la canopée du jeune plant (canopy size seedling)*

Spécification de la couverture initiale de la canopée (CC_0)

CC_0 peut être spécifiée en:

- spécifiant la densité des plantes dans le menu *Caractéristiques culturales (crop characteristics)*;
- spécifiant le taux de semis ou l'espacement entre plantes. Cette option devient disponible en cliquant sur la commande **<Estimer>** (*estimate*) dans le menu *Caractéristiques culturales*. La densité des plantes dans le menu *Estimation de la densité des plantes (estimate plant density)* est calculée à partir du taux de semis spécifié et du taux de germination approximatif, ou à partir de l'espacement des raies et plantes dans la raie (Fig. 2.9b3);
- sélectionnant une des classes entre la plus petite et la plus grande couverture (Tab. 2.9b1);
- spécifiant directement le pourcentage dans le menu *Caractéristiques culturales*, qui pourrait être nécessaire pour la transplantation du jeune plant.

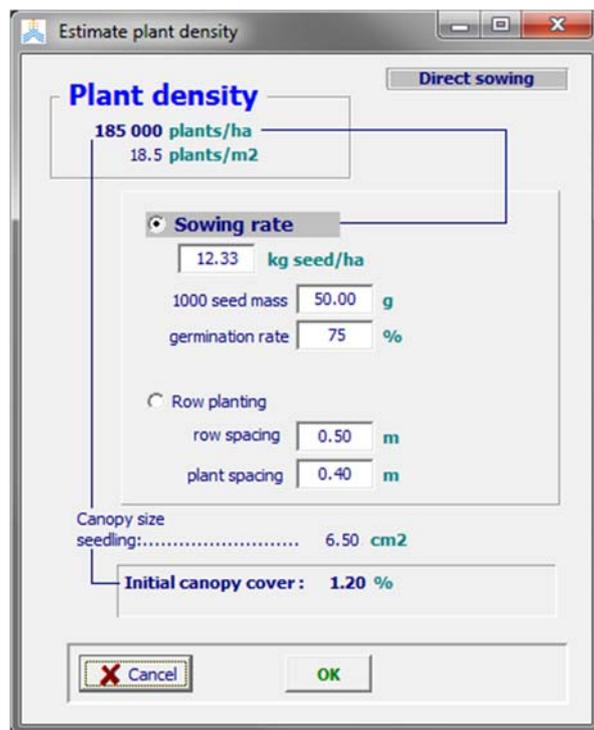


Figure 2.9b3 - Estimation de la densité des plantes à partir du taux de semis ou de la densité des plantes dans le menu *Estimation de la densité de plantes (estimate plant density)*

Tableau 2.9b1 - Classes, valeurs par défaut correspondantes et plages pour la couverture initiale de la Canopée (CC₀)

Classe	Valeur par défaut	Plage
Très petite couverture	0.10 %	0.10 - 0.12 %
Petite couverture	0.20 %	0.13 - 0.30 %
Bonne couverture	0.40 %	0.31 - 0.50 %
Grande couverture de canopée	0.70 %	0.51 - 0.70 %
Très grande couverture de canopée (généralement pour des transplantations)	1.50 %	0.71 - 10.00 %

- **Développement de la canopée**

L'expansion de la couverture de canopée (CC) dans des conditions sans stress est décrite par deux équations (voir Chapitre 3– section 3.3.2 Développement de la canopée) nécessitant de l'information sur (i) la couverture initiale de la canopée (CC_0), (ii) la couverture maximale de la canopée (CC_x) pour cette densité de plantes sous des conditions optimales, et (iii) le coefficient de croissance de canopée (CGC). Dès que la sénescence commence, la CC baisse. Pour simuler la baisse de la canopée, le moment du démarrage de la sénescence et le coefficient de déclin de canopée (CDC) sont exigés. Les paramètres de culture qui gèrent l'expansion et/ou le déclin de la canopée sont présentés dans la page de développement de la canopée du menu *Caractéristiques culturales* (*crop characteristics*) (Fig. 2.9b4).

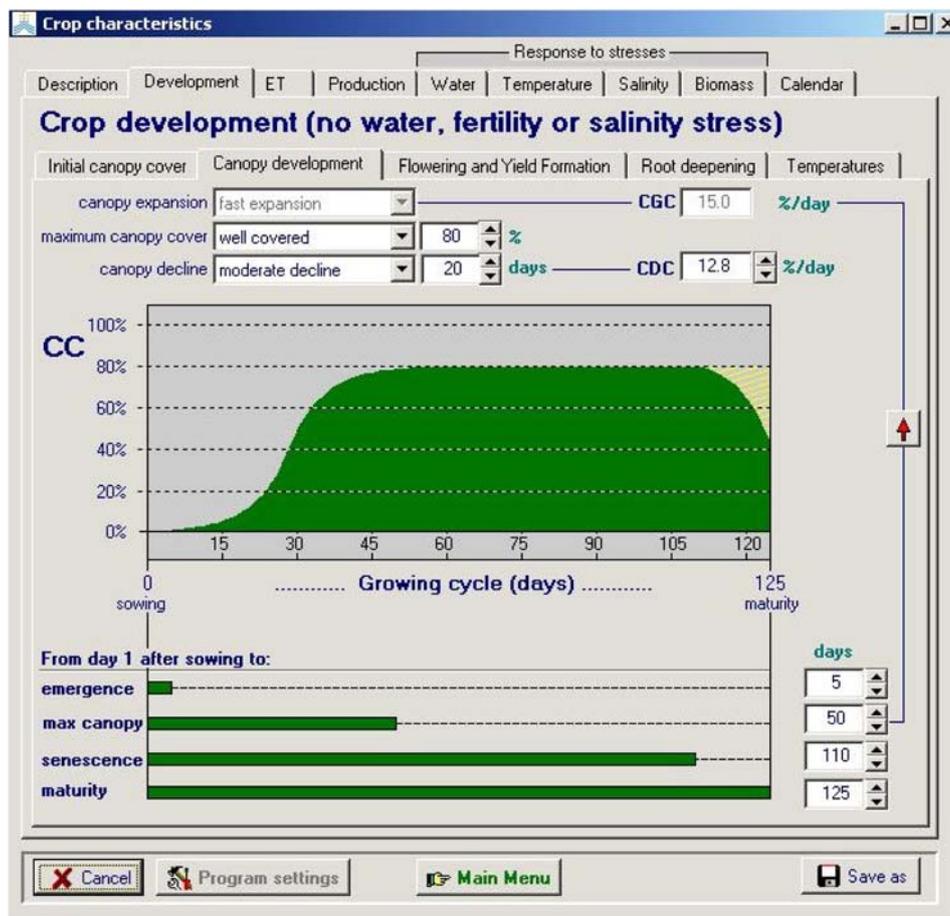


Figure 2.9b4 - Spécification du développement de la canopée dans le menu *Caractéristiques culturales* (*crop characteristics*)

Temps de l'émergence (emergence): C'est le temps requis à partir du semis pour atteindre 90% d'émergence. A cause de la préparation du sol, la température du sol et son contenu en eau varient selon les cas. Dès lors, le temps de l'émergence est à spécifier par l'utilisateur.

Coefficient de croissance de canopée (CGC ; *canopy growth coefficient*) et le temps exigé pour atteindre la canopée maximale: CGC est un paramètre de culture conservateur. AquaCrop donne des procédures alternatives pour spécifier le CGC ou le temps exigé pour atteindre la CC_x :

- Si la flèche rouge est dirigée vers le bas (Fig. 2.9b4), le temps pour atteindre la couverture maximale de la canopée est dérivé du coefficient de croissance de canopée spécifié;

- Si la flèche rouge est dirigée vers le haut, le coefficient de croissance de canopée est dérivé du temps spécifié pour atteindre la couverture maximale de la canopée;
- Le coefficient de croissance de canopée peut aussi être spécifié en sélectionnant l'une des classes allant d'une expansion la plus lente à la plus rapide (Tab. 2.9b2).

Tableau 2.9b2 - Classes, valeurs par défaut et plages correspondantes, pour le coefficient de croissance de canopée (CGC ; *canopy growth coefficient*) dans des conditions sans stress.

Classe	Valeur par défaut	Plage
Expansion très lente	3 %/jour	2.0 - 4.0 %/jour
Expansion lente	6 %/ jour	4.1 - 8.0 %/jour
Expansion modérée	10%/ jour	8.1 - 12.0 %/jour
Expansion rapide	15%/ jour	12.1 - 16.0%/jour
Expansion très rapide	18%/ jour	16.1 - 40.0 %/jour

Couverture maximale de canopée (CC_x): la couverture maximale de la canopée est dépendante de la densité des plantes, de la CC par les jeunes plants à 90% d'émergence, et du CGC. L'utilisateur sélectionne une des classes qui vont de la couverture 'la plus faible' à celle 'entièrement couverte' (Tab. 2.9b3). AquaCrop présente la couverture du sol correspondante à la canopée maximale. La CC_x peut aussi être spécifiée en introduisant directement le pourcentage.

Tableau 2.9b3 - Classes, valeurs par défaut et plages correspondantes, pour la couverture maximale de canopée attendue (CC_x) dans des conditions sans stress

Classe	Valeur par défaut	Plage
Couverture très mince	40 %	11 - 64 %
Couverture moyenne	70 %	65 - 79 %
Bonne couverture	90 %	80 - 89 %
Presque entièrement couverte	95 %	90 - 98 %
Entièrement couverte	99 %	99 - 100 %

Temps de démarrage de la sénescence (*Senescence*): La période à laquelle la sénescence de la canopée commence dans les conditions optimales. Le moment de démarrage de la sénescence dépend de la phénologie et de la variété culturale.

Coefficient de déclin de canopée (CDC ; *canopy decline coefficient*): En sélectionnant une des classes pour le déclin de la canopée allant d'une très lente baisse à une baisse très rapide (Tab. 2.9b4), le coefficient de déclin de canopée (CDC) est dérivé du nombre de jours exigé pour accomplir la sénescence complète. Le coefficient de déclin de canopée peut aussi être directement spécifié. Le coefficient de déclin de canopée est supposé conservateur.

Tableau 2.9b4 - Classes, valeurs par défaut et plages correspondantes, pour le déclin de la canopée exprimées en jours avant d'atteindre la sénescence complète

Classe	Valeur par défaut	Plage
Déclin très lent	5 semaines	plus de 31 jours
Déclin lent	4 semaines	25 - 31 jours
Déclin modéré	3 semaines	18 - 24 jours
Déclin rapide	2 semaines	13 - 17 jours
Déclin très rapide	10 jours	moins de 13 jours

Temps de maturité (*maturity*): L'utilisateur spécifie le moment auquel la maturité sera atteinte. Quand la culture est récoltée plus tard, il est supposé que la production ne changera plus.

- **Floraison et production (cultures fruitières/céréalières)**

Les paramètres de culture à spécifier sont (i) le temps au début de la floraison, (ii) la durée de la floraison, (iii) le temps nécessaire pour le développement de l'Indice de Récolte (HI) et (iv) si la croissance déterminée est liée à la floraison (Fig. 2.9b5). Ces paramètres sont principalement spécifiques à la variété culturale.

Quand l'onglet <**Croissance déterminée liée à la floraison**> (*determinancy linked with flowering*) est activé (Fig. 2.9b5), la culture a une croissance déterminée (une croissance déterminées des structures), et la couverture de la canopée est considérée avoir une croissance potentiel (si $CC < CC_x$) jusqu'à l'apogée de la floraison (à la moitié de la durée de la floraison), mais n'y est plus après. Si à cause du temps de la floraison choisi, CC_x ne peut pas atteindre l'apogée de la floraison, AquaCrop ajuste dans le menu *Caractéristiques culturales* (*crop characteristics*), la durée de la floraison jusqu'à ce que les conditions puissent être remplies.

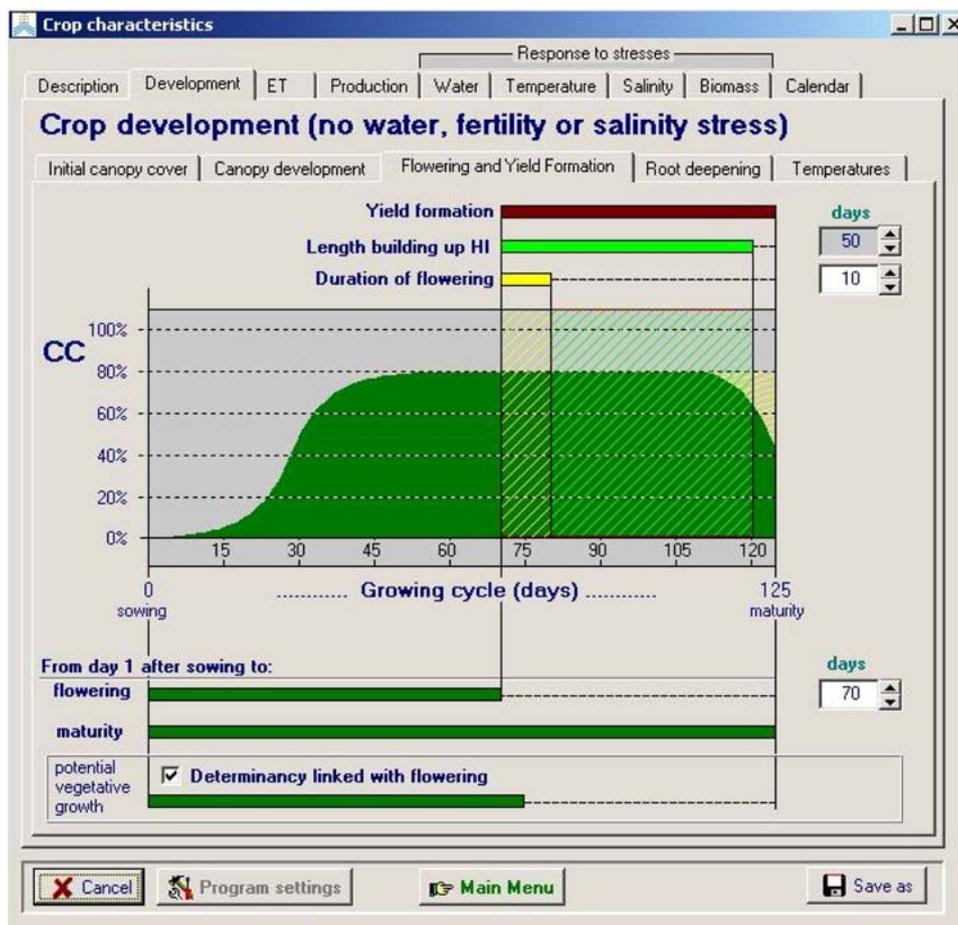


Figure 2.9b5 - Spécification de la floraison et du temps exigé pour créer l'Indice de récolte pour des cultures fruitières/céréalières dans le menu *Caractéristiques culturales* (*crop characteristics*) pour une culture où la croissance déterminée est liée à la floraison.

Si l'onglet 'croissance déterminée' n'est pas activé, (Fig. 2.9b6), le développement de la canopée peut s'étaler jusqu'à la sénescence. La période correspondante à la croissance végétative optimale est affichée.

Le temps requis pour que l'Indice de récolte croisse de 0 (à la floraison) à sa valeur de référence (HI_0) dans des conditions optimales, est la durée pour la création de HI. L'Indice de récolte devrait atteindre sa valeur de référence à, ou peu avant la maturation.

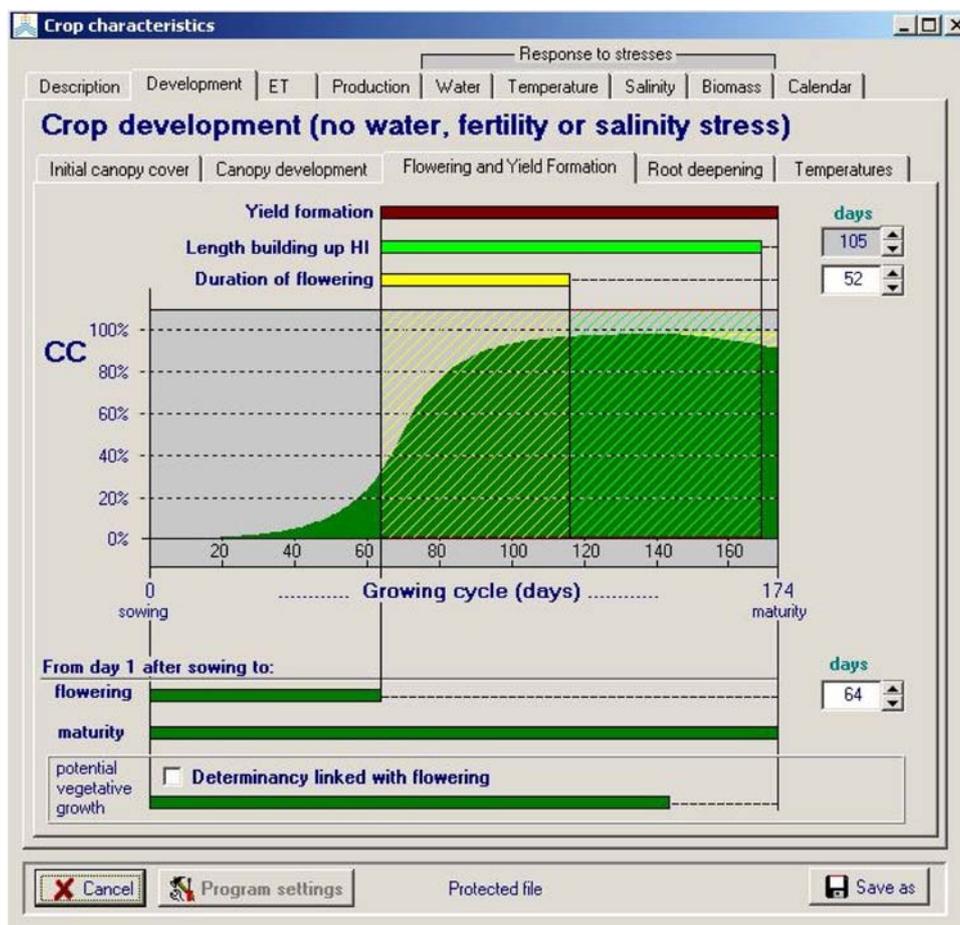


Figure 2.9b6 - Spécification de la floraison et du temps exigé pour créer l'Indice de récolte pour des cultures fruitières/céréalières dans le menu *Caractéristiques culturales* (*crop characteristics*) pour une culture où la croissance déterminante n'est pas liée à la floraison, comme le coton

- **Formation de racine/tubercule (culture de racine/tubercule)**

Les paramètres de culture à spécifier sont (i) le début de formation de tubercule ou l'agrandissement de la racine et (ii) le temps requis pour créer l'Indice de Récolte (HI) (Fig. 2.9b7). Ces paramètres sont principalement spécifiques à la variété de culture.

Les cultures de racine/tubercule sont supposées avoir une croissance non-déterminée. D'où le développement de la canopée peut s'étaler jusqu'à la sénescence. La période correspondante à la croissance végétative potentielle est affichée dans le menu.

Le temps requis pour que l'Indice de récolte (HI) croisse de 0 (au début de formation de tubercule ou d'agrandissement des racines) à sa valeur de référence (HI_0) dans des conditions optimales, est la durée de création de HI. L'Indice de récolte devrait pouvoir atteindre sa valeur de référence à la maturité ou peu avant la maturité.

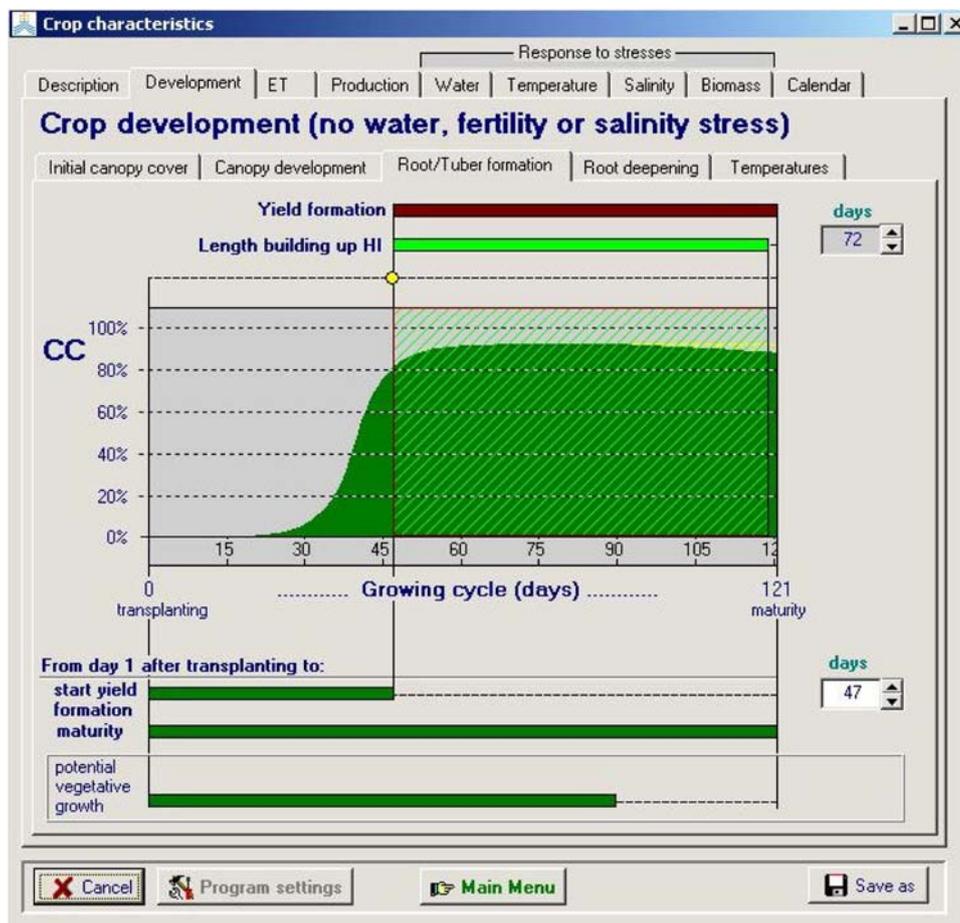


Figure 2.9b7 - Spécification du début de la formation du rendement et temps nécessaire pour créer l'Indice de récolte pour une culture de racine/tubercule dans le menu *Caractéristiques culturales (crop characteristics)*

- **Enfoncement racinaire**

Les paramètres de culture à spécifier sont (i) la profondeur maximale effective d'enracinement et (ii) le temps mis pour l'atteindre, (iii) la profondeur minimale effective d'enracinement et (iv) un facteur de forme pour la courbe du développement dans le temps de l'enracinement vertical (Z) (Fig. 2.9b8). Ces paramètres sont spécifiés par l'utilisateur puisque le développement racinaire est fortement influencé par des conditions locales de sol et la longueur du cycle de la culture.

La *profondeur minimale effective d'enracinement* (*minimum effective rooting depth*) se réfère à la profondeur où la plantule peut extraire l'eau. Pour des buts de simulation, on considère généralement une profondeur de 0.20 à 0.30 m.

La *profondeur maximale effective d'enracinement* (*maximum effective rooting depth*) peut être spécifiée en choisissant une des classes qui s'étendent des 'cultures à enracinement vertical faible' aux 'cultures à enracinement très profond'. La catégorie de cultures à enracinement faible est uniquement applicable au riz et aux cultures qui ont un cycle très court comme le radis. AquaCrop affiche la profondeur d'enracinement maximale effective correspondante. La profondeur d'enracinement peut aussi être spécifiée en saisissant directement la valeur numérique en mètre. Comme indicateur général, le taux d'enracinement vertical est d'environ 2 cm par jour quand l'environnement est optimal pour la croissance, le sol n'est pas froid et les couches de sol qui limitent la croissance sont absentes.

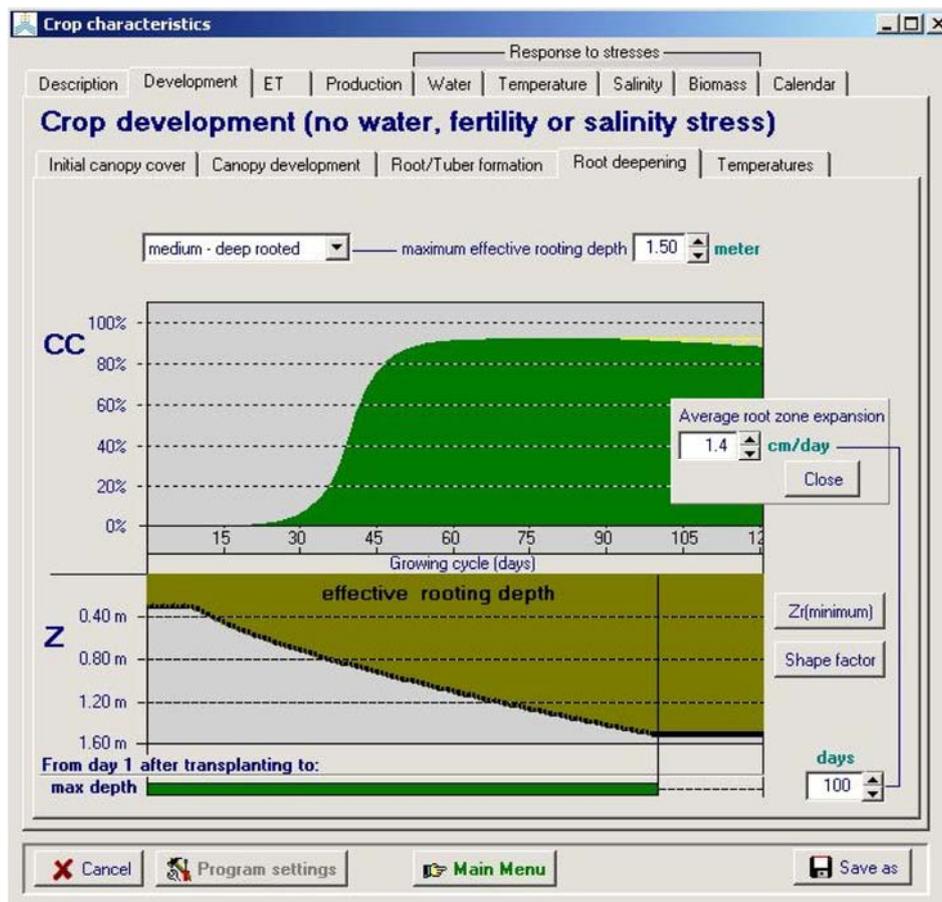


Figure 2.9b8 - Spécification de l'enracinement vertical dans le menu *Caractéristiques culturales* (*crop characteristics*)

Tableau 2.9b5 - Classes, valeurs par défaut correspondantes, et plages pour la profondeur d'enracinement effective maximale d'une culture entièrement développée dans des conditions optimales

Classe	Valeur par défaut	Plage
Cultures à enracinement peu profond	0.3 m	0.10 - 0.39
moyennement - peu profond	0.6 m	0.40 - 0.99
Enracinement moyen	1.0 m	1.00 - 1.99
Enracinement profond	1.35 m	2.00 - 2.99
Enracinement très profond (annuelles)	2.00 m	3.00 - 10.0

En variant le facteur de forme de la courbe Z en fonction du temps, le taux d'expansion de la zone de racines peut être changé entre la plantation et le moment où la profondeur d'enracinement maximale est atteinte.

La profondeur d'enracinement effective ne pourra pas atteindre sa valeur maximale si une couche de sol imperméable bloque le développement des racines ou quand la profondeur de sol exploitable est plus petite que la profondeur d'enracinement maximale. Le taux d'enracinement vertical est décrit par le facteur de forme, mais une fois que la profondeur d'enracinement effective atteint la couche de sol imperméable, l'expansion est interrompue (Fig. 2.9b9).

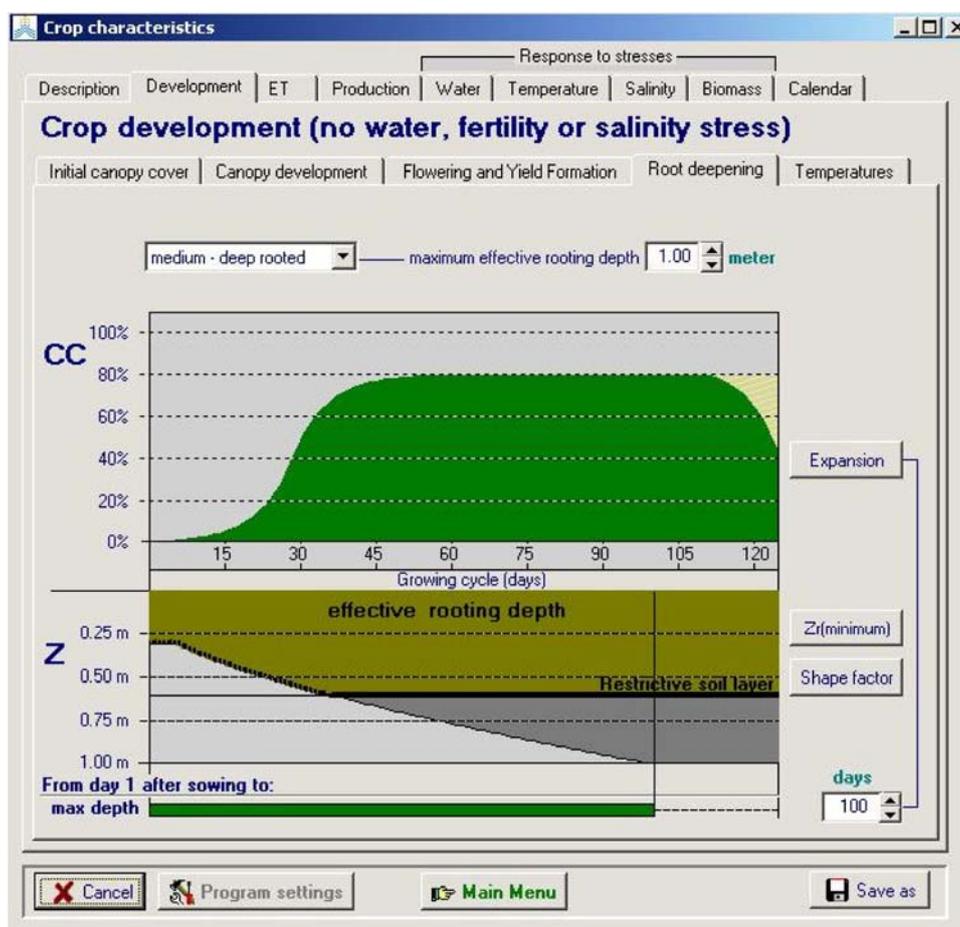


Figure 2.9b9 - Effet d'une couche de sol imperméable sur le développement des racines

- **Températures pour les degrés jours de croissance (DJC)**

Le développement de la culture peut être spécifié en jours calendaires ou en degrés jours de croissance (DJC). Pour le calcul des DJC, une température de base (en-dessous de laquelle le développement de la culture ne progresse pas) et une température supérieure (au-dessus de laquelle le développement de la culture n'augmente plus) sont requises (voir Chapitre 3 - section 3.2 degrés jours de croissance). Ces températures sont conservatrices pour une espèce donnée, mais peuvent être spécifiques aux variétés culturales dans des environnements résolument différents. Les températures de base et supérieure sont spécifiées dans l'onglet Températures (Fig. 2.9b10).

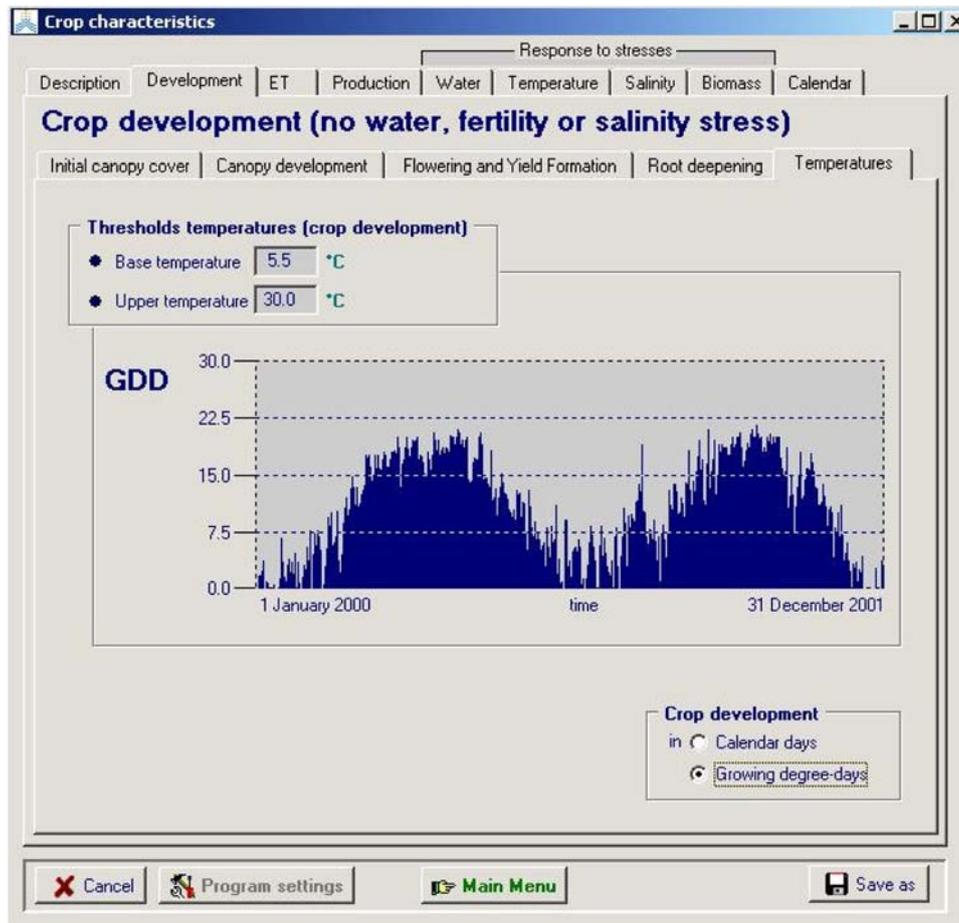


Figure 2. 9b10 - Spécification du seuil des températures de base et supérieure dans le menu *Caractéristiques culturales (crop characteristics)*

2.9.3 Evapotranspiration

- Coefficients

Le coefficient d'évaporation de l'eau du sol (K_e) et le coefficient de transpiration de la culture (K_{cTr}) sont schématisés du semis à la maturité dans la Figure 2.9c1.

L'évaporation d'une surface du sol entièrement humide est inversement proportionnelle à la couverture de la canopée effective. Le facteur de proportionnalité est le coefficient d'évaporation du sol pour une surface du sol entièrement humide et non ombragée (K_{ex}). C'est un paramètre de programme (voir 2.9.11 Paramètres de configuration du programme) avec une valeur par défaut de 1.1. Quand la couverture de la canopée baisse (sénescence) tard dans la saison, comme dictée par la phénologie, ou provoquée par l'eau, les substances nutritives ou le stress de salinité, l'évaporation du sol demeure quelque peu réduite par l'effet de la protection de la couverture de la canopée jaune ou morte. Le paramétrage de l'effet d'abri de canopée est basé sur la possibilité de la canopée à conserver plus ou moins ses feuilles mortes au moment de la sénescence.

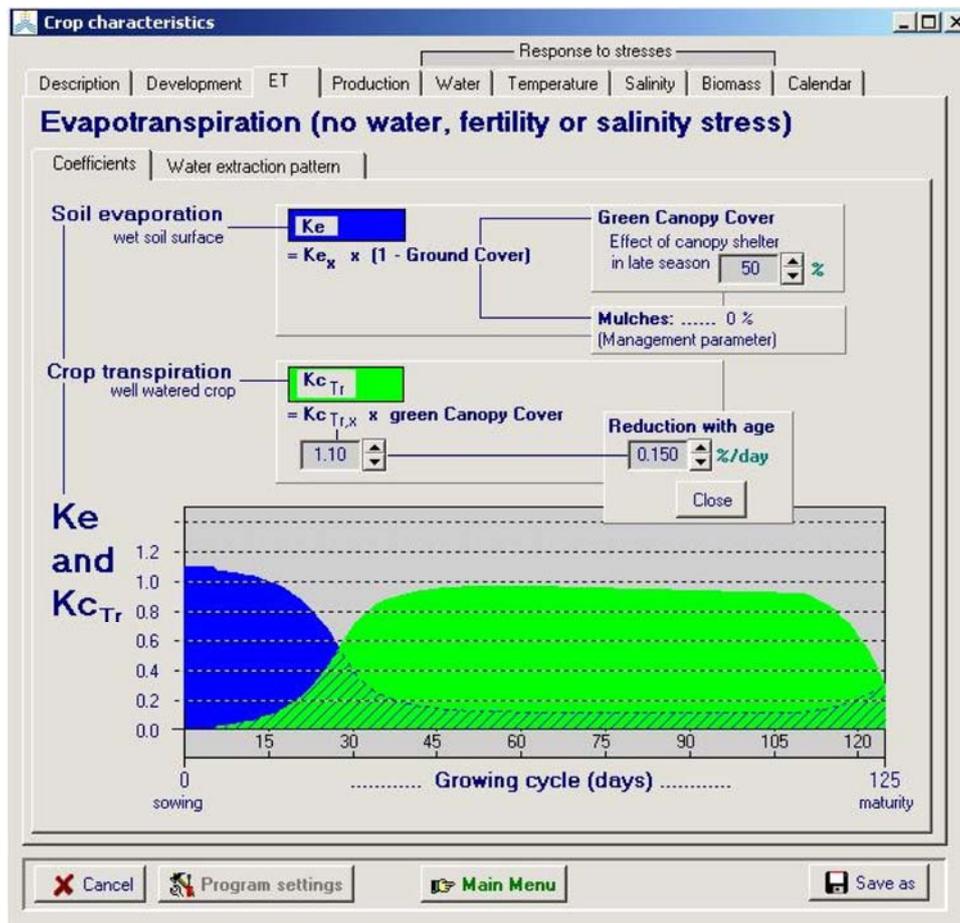


Figure 2.9c1 - Réponse des coefficients d'évaporation du sol (K_e) et de la transpiration de la culture (K_{cTr}) au développement et déclin de la canopée pendant le cycle de croissance pour des conditions non-limitantes

La transpiration d'une culture sur un sol bien humide est proportionnelle à la couverture de la canopée effective. Le facteur de proportionnalité est le coefficient de transpiration maximale

($K_{c_{Tr,x}}$). C'est le coefficient de culture lorsque la couverture de la canopée est complète ($CC=1$) et sans stress. Le $K_{c_{Tr,c}}$ est conservateur et approximativement équivalent au coefficient basal de culture à mi-saison, dans 'FAO Irrigation and Drainage Paper 56', mais seulement pour les cas d'une couverture maximale (CC_x). Après le temps nécessaire pour atteindre la couverture maximale de canopée (CC_x) dans des conditions optimales et avant la sénescence, la canopée vieillit lentement et subit une progressive mais petite réduction de transpiration et de capacité photosynthétique. Ceci est simulé en réduisant le $K_{c_{Tr,x}}$ par une fraction très légère et constante par jour (Fig. 2.9c1).

- **Mode d'extraction de l'eau**

L'extraction de l'eau du profil de sol à partir des racines est dirigée par le contenu réel en eau du sol et la quantité maximale d'eau (S_x) qui peut être extraite par les racines par unité de volume apparent du sol, par unité de temps (m^3 d'eau par m^3 de sol par jour). S_x en haut du profil de sol diffère généralement du S_x du fond de la zone racinaire. En spécifiant l'extraction maximale des racines d'une culture bien développée (une valeur par défaut de 15 mm/jour est considérée pour les zones racinaires au-delà de 0.5 m de profondeur) et le mode d'extraction de l'eau dans la zone racinaire, les valeurs de S_x sont données dans AquaCrop pour différentes profondeurs de la zone racinaire (Fig. 2.9c2).

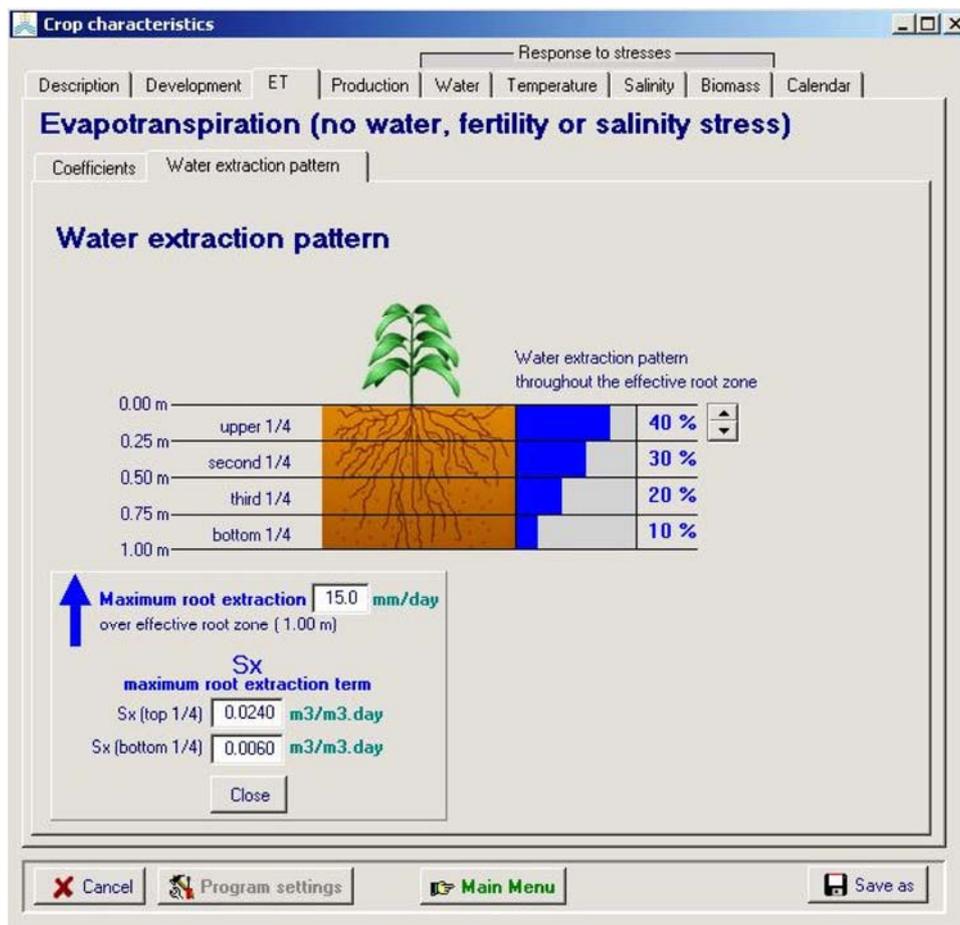


Figure 2.9c2 - Termes d'extraction maximale (S_x) en haut et en bas de la zone racinaire après la spécification du mode d'extraction de l'eau et de l'extraction maximale des racines

Si une couche de sol bloque l'expansion de la zone racinaire, le terme d'extraction maximale de la racine au bas de la zone augmente quand les racines continuent à se développer. Ceci simule la concentration de racines au-dessus de la couche de sol imperméable. Quand une couche imperméable est présente dans le profil de sol, l'ajustement des termes d'extraction peut être affiché dans AquaCrop (Fig. 2.9c3).

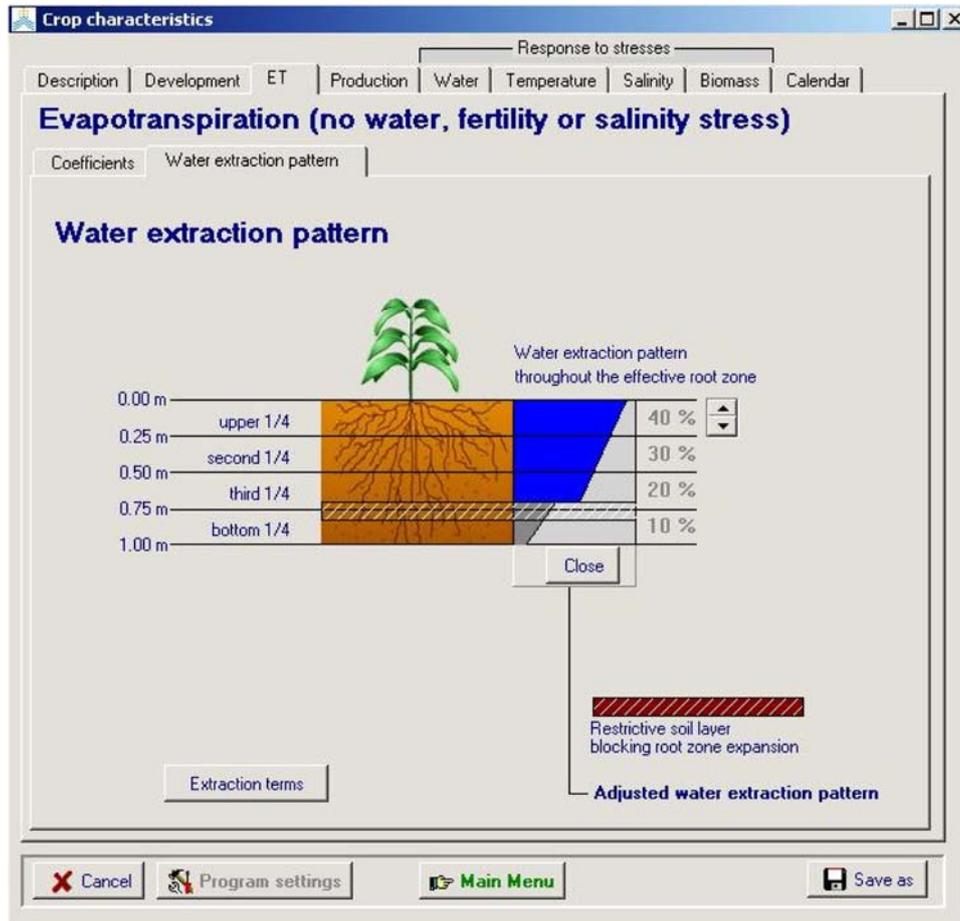


Figure 2.9c3 - Ajustement du mode d'extraction de l'eau en présence d'une couche de sol imperméable bloquant l'expansion de la zone racinaire

2.9.4 Production

- Productivité de l'eau d'une culture normalisée pour le climat et le CO₂ (WP*)

Pour simuler la biomasse et le rendement, la productivité de l'eau normalisée pour le climat et pour la concentration du CO₂ de l'air (WP* ; *crop water productivity*) est exigée. WP* est un paramètre conservateur. Pour une utilisation avec les espèces de culture sans WP* calibrée, des valeurs générales sont fournies par AquaCrop pour les espèces C3 et C4. Si l'organe récoltable est riche en huile et/ou protéines, WP* après le début de floraison doit être réduit durant la période de formation du rendement, en le multipliant par un facteur d'ajustement entré par l'utilisateur (Fig. 2.9d1).

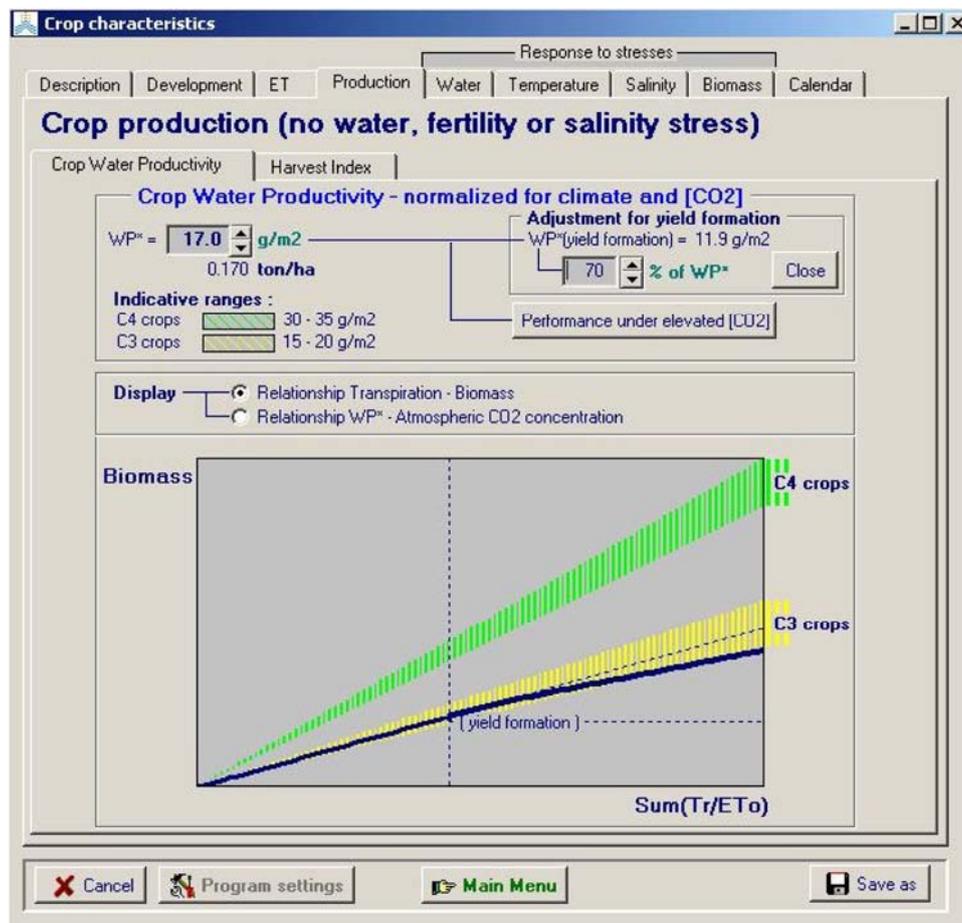


Figure 2.9d1 - Productivité de l'eau (*crop water productivity*) normalisée pour le climat et la concentration atmosphérique du CO₂, et son ajustement si les organes récoltables sont riches en huile et/ou en protéines

- **Performance sous une concentration atmosphérique élevée de CO₂**

WP* est ajustée quand on exécute une simulation avec une concentration atmosphérique de CO₂ différente de la valeur de référence (c'est-à-dire 369.41 ppm mesurés à Mauna Loa, à Hawaii 2000). L'ajustement est obtenu en multipliant WP* avec un coefficient de correction comme discuté dans le Chapitre 3 (Section 3.11 Biomasse au-dessus du sol). L'ajustement théorique ne pourra pas être entièrement valable quand (i) la fertilité du sol n'est pas correctement ajustée à la productivité accrue dans des conditions de concentration élevée de CO₂, et/ou (ii) la capacité d'absorption de la variété de culture n'est pas encore capable de prendre en charge une concentration élevée de CO₂. La performance de la culture sous une concentration atmosphérique élevée de CO₂ peut être ajustée par l'utilisateur, en changeant ses capacités d'absorption en accord avec la gestion attendue de la fertilité du sol et de la variété cultivée (Fig. 2.9d2).

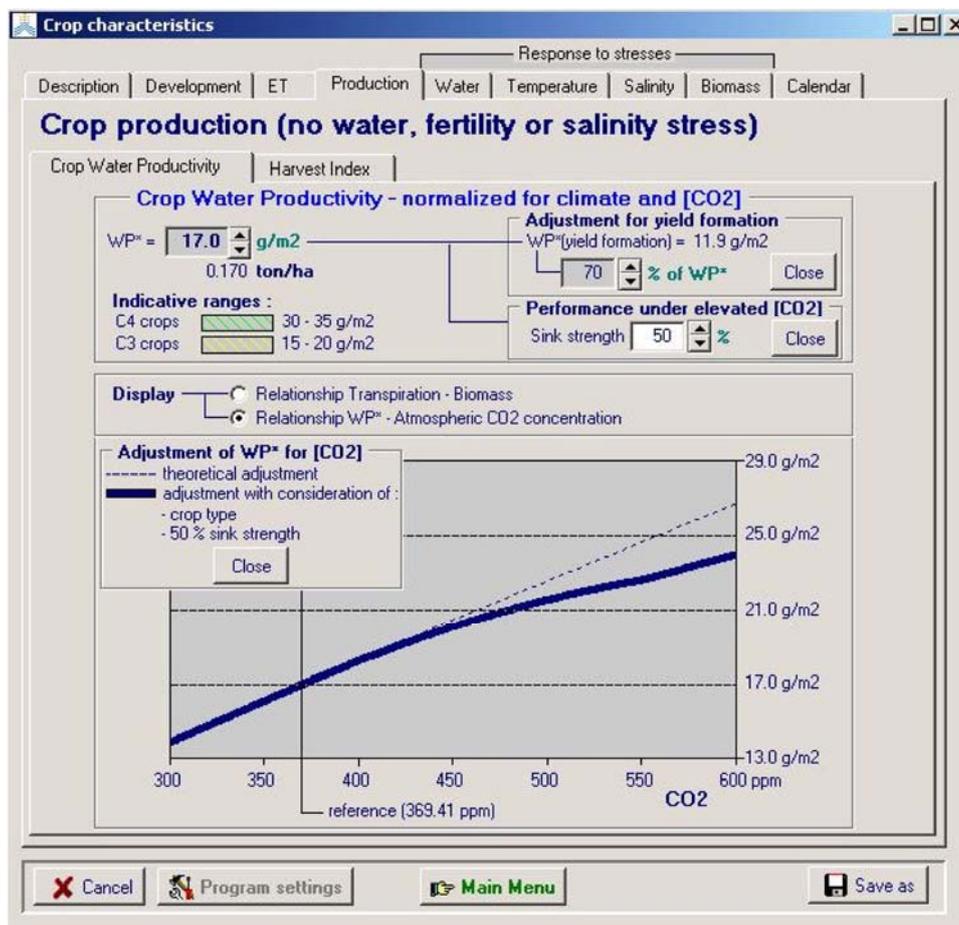


Figure 2.9d2 - Productivité de l'eau ajustée à la concentration atmosphérique en CO₂ en considérant le type de culture et la capacité d'absorption de la culture

- **Indice de récolte de référence (HI₀)**

L'Indice de récolte de référence (HI₀ ; *harvest index*) est l'HI représentatif rapporté dans la littérature pour l'espèce de cultures choisie dans des conditions sans stress. HI₀ est conservateur, mais peut être spécifique à la variété culturale.

Cultures fruitières/céréalières

Commençant au début de la floraison, HI augmente linéairement après une phase de décalage jusqu'à ce que la maturité physiologique soit atteinte (Fig. 2.9d3). La valeur atteinte à la maturité sous conditions sans stress est considérée comme HI₀ pour ces espèces.

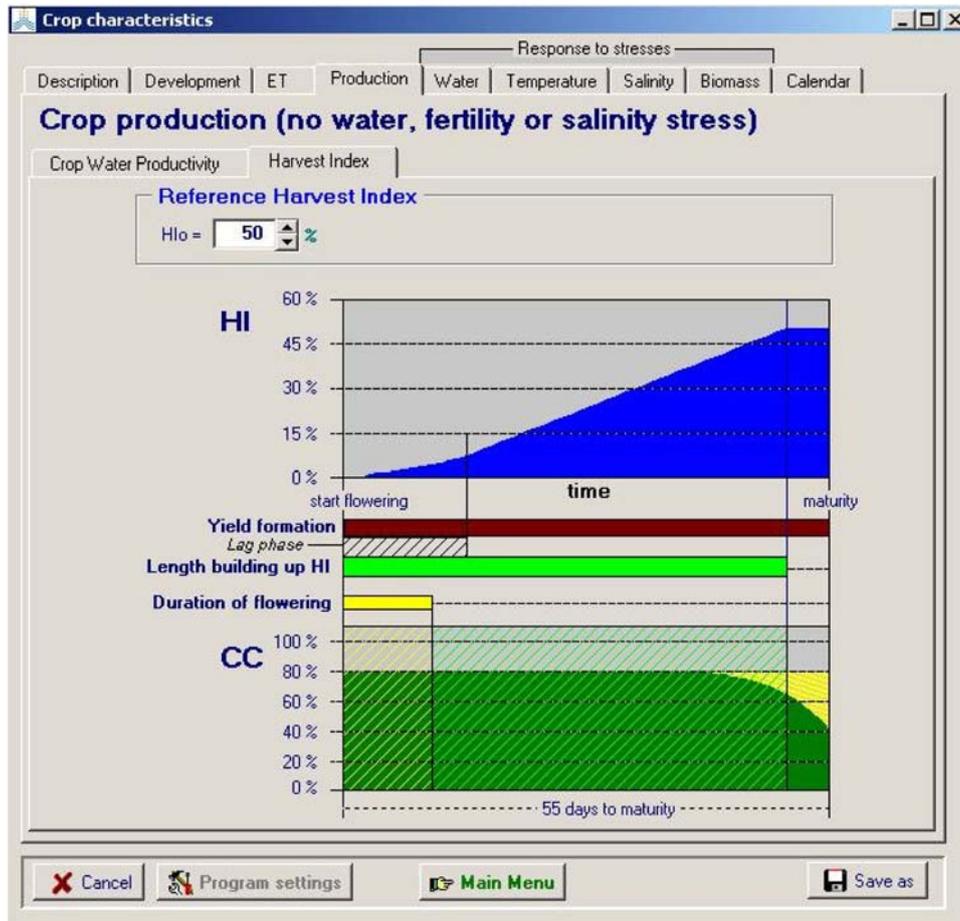


Figure 2.9d3 - Spécification de l'Indice de récolte de référence (HI₀ ; *reference harvest index*) et schématisation de l'accroissement de l'Indice de récolte de la floraison à la maturité physiologique, pour des cultures de production de fruits ou graines

Racine et tubercules

Commençant à la formation du tubercule ou à l'élargissement des racines, HI augmente jusqu'à la maturité physiologique (Fig. 2.9d4). La création de l'Indice de récolte est décrite par une fonction logistique. La valeur atteinte à la maturité dans des conditions sans stress est considéré comme HI_0 pour ces espèces.

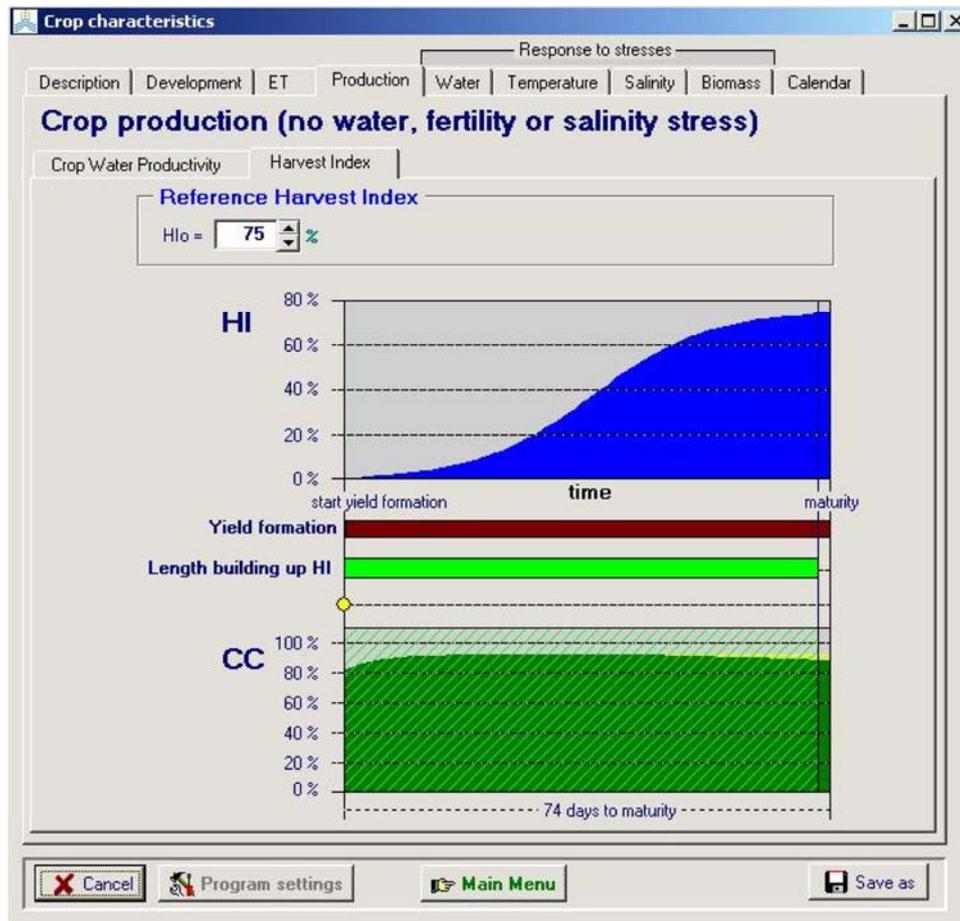


Figure 2.9d4 - Spécification de l'Indice de récolte de référence (HI_0) et présentation de l'accroissement de l'Indice de récolte de la formation de tubercule ou de l'élargissement des racines, à la maturité physiologique des racines et tubercules

Cultures- feuilles

Débutant à la germination, HI augmente avec une équation logistique jusqu'à ce que l'Indice de récolte de référence (HI_0) soit atteinte (Fig. 2.9d5). Pour les cultures feuillues, le temps pour atteindre HI_0 est exprimé comme un pourcentage du cycle de croissance.

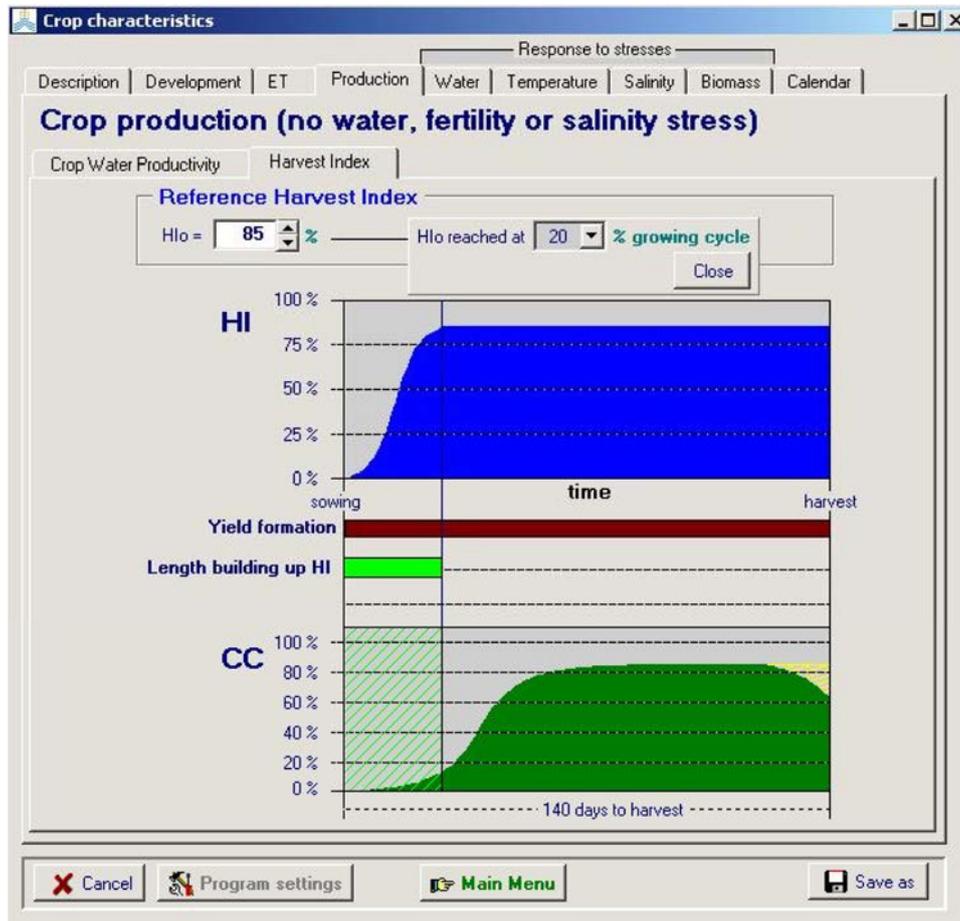


Figure 2.9d5 - Spécification de l'Indice de récolte de référence (HI_0) et le temps nécessaire pour atteindre HI_0 pour des cultures feuillues

2.9.5 Stress hydrique

- **Expansion de la canopée, conductance stomatique et début de la sénescence**

Les effets du stress hydrique sur l'expansion de la canopée, la conductance stomatique et le début de la sénescence de canopée sont décrits par des coefficients de stress hydrique K_s . Au-dessus d'un seuil supérieur de contenu en eau du sol, le stress hydrique n'est pas considéré et K_s est égal à 1. En dessous d'un seuil inférieur, le stress est à son effet complet et K_s est égal à 0 (Fig. 2.9e1). L'utilisateur peut spécifier les seuils dans les menus correspondants et ajuster la courbe, il peut aussi choisir une classe pour la résistance relative au stress hydrique.

Seuils: Les seuils sont exprimés comme une fraction (p) de l'eau totale disponible du sol (TAW). TAW est la quantité d'eau qu'un sol peut retenir entre la capacité au champ (FC) et le point de flétrissement permanent (PWP). Pour la croissance des feuilles et de la canopée, le seuil inférieur est au-dessus du PWP ($p < 1$), alors que pour les stomates et la sénescence, le seuil inférieur est fixé à PWP ($p = 1$).

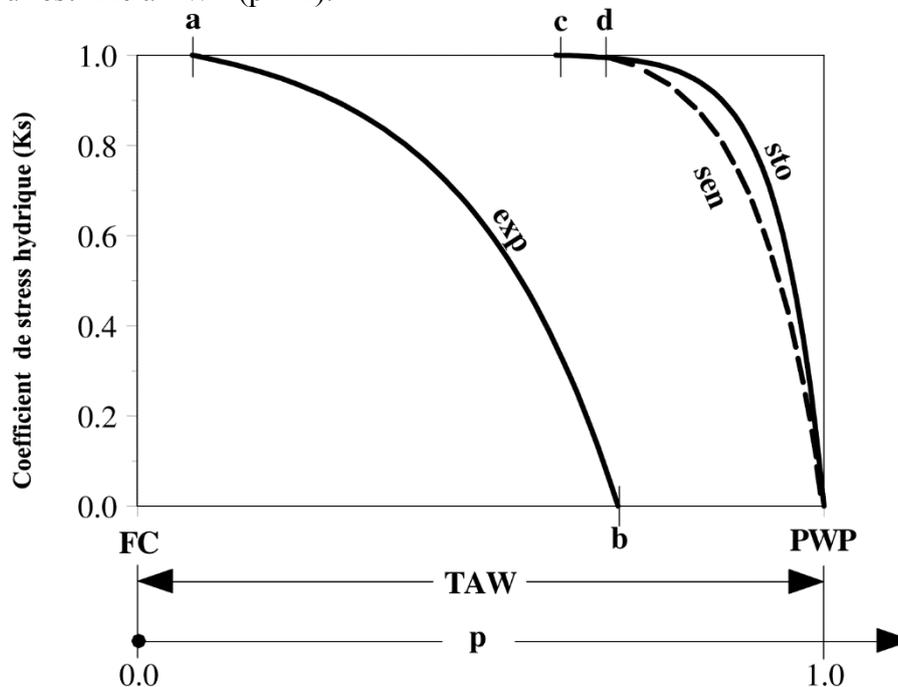


Figure 2. 9e1 - Exemples de variations de coefficient de stress hydrique pour l'expansion des feuilles (exp), la conductance stomatique (sto) et la sénescence de la canopée (sen) pour divers niveaux d'épuisements en eau du sol

Forme de la courbe de K_s : Entre les seuils supérieurs et inférieurs, la forme de la courbe de K_s détermine l'ampleur de l'effet de stress hydrique du sol sur le processus. La forme de la courbe peut être linéaire ou convexe (Fig. 2.9e2). Des tests suggèrent jusqu'ici que les seuils et les formes de ces courbes peuvent être conservateurs, au moins à degré près. Le facteur de forme peut s'étendre de + 6 (fortement convexe) à 0 (linéaire).

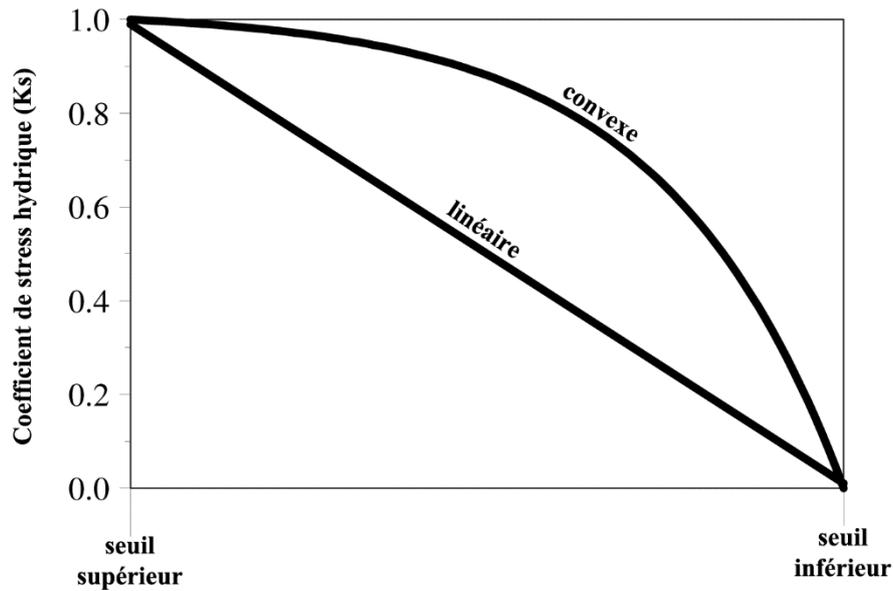


Figure 2.9e2- Formes convexe et linéaire de la courbe Ks

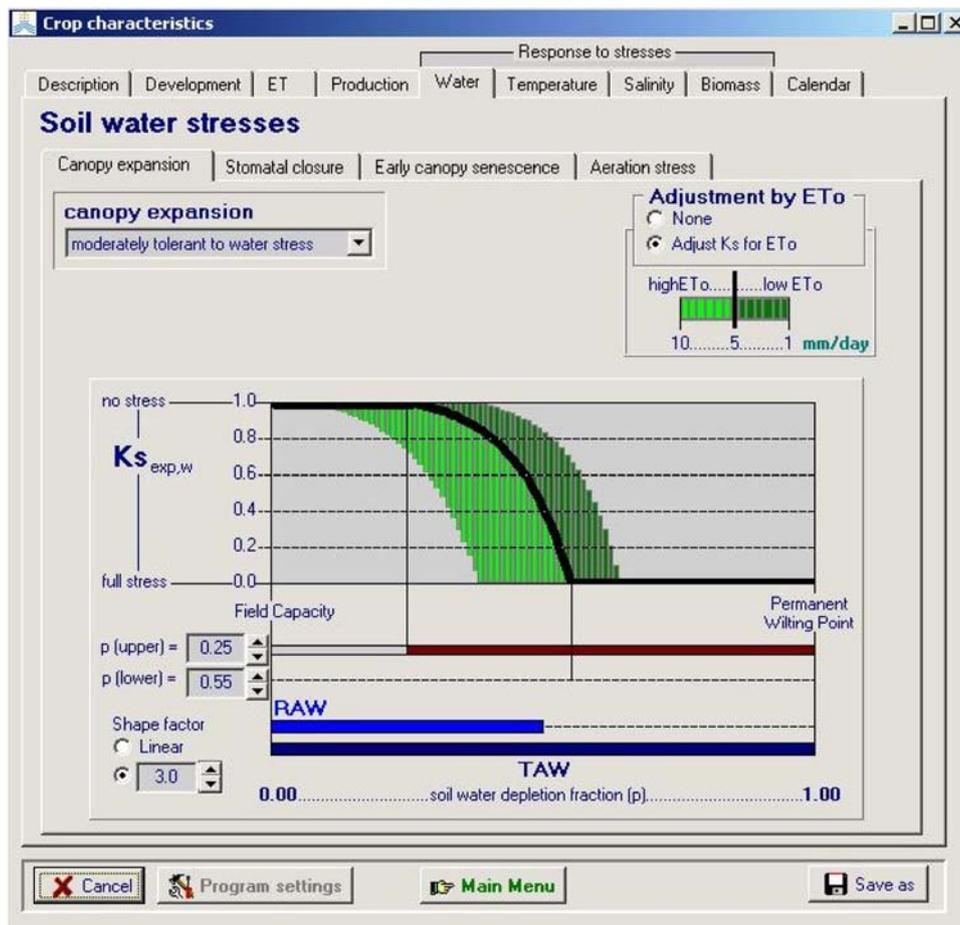


Figure 2.9e3 - Spécification des seuils supérieurs (*upper*) et inférieurs (*lower*) et la forme de la courbe (*shape factor*) Ks pour l'effet du stress hydrique sur l'expansion de la canopée (*canopy expansion*) ($K_{s,exp,w}$)

Ajustement par ET_0 (adjustment by ET_0): Généralement les états hydriques de feuille et plante sont partiellement dépendants du taux de transpiration, étant bas pour le taux de transpiration est élevé. AquaCrop simule cet effet indirectement en ajustant la courbe de K_s suivant l' ET_0 . Les facteurs d'épuisements d'eau du sol (p) sont pour une demande évaporatoire de référence d' $ET_0 = 5 \text{ mm / jours}$, et le facteur (p) est ajusté durant la simulation aux différents niveaux d' ET_0 . Les bandes ombrées sur les deux côtés de la courbe (Fig. 2.9e3) indiquent les écarts des demandes d'ajustement d'évaporation comme dictées par ET_0 . L'ajustement n'est pas considéré si la correction pour ET_0 est éteinte.

Expansion de la canopée (canopy expansion): Des feuilles poussent à travers une expansion de leur superficie (la croissance expansive), et donc le développement de la canopée est le plus sensible au stress hydrique parmi tous les processus de la plante décrits par le modèle. L'utilisateur spécifie l'effet du stress hydrique sur la croissance expansive des feuilles, en choisissant une classe de sensibilité (Tab. 2.9e1, Fig. 2.9e3) ou en spécifiant les seuils supérieurs et inférieurs d'épuisement d'eau du sol (p) :

- p (upper/supérieur) : la fraction de l'eau totale du sol disponible (TAW ; total available water) qui peut être épuisé de la zone racinaire avant que l'expansion de feuilles ne commence à être limitée;
- p (lower/inférieur) : quand cette fraction de TAW est épuisée de la zone racinaire, il n'y a plus de croissance expansive des feuilles (réduction de 100%).

Tableau 2.9e1 - Les classes et les valeurs par défaut correspondantes, pour les fractions d'épuisement d'eau du sol pour l'expansion de la canopée

Classe Sensibilité au stress hydrique	Fraction d'épuisement d'eau du sol pour l'expansion de la canopée (p_{exp})	
	p (supérieur)	p (inférieur)
Extrêmement sensible au stress hydrique	0.00	0.35
Sensible au stress hydrique	0.10	0.45
Modérément sensible au stress hydrique	0.20	0.55
Modérément tolérant au stress hydrique	0.25	0.60
Tolérant au stress hydrique	0.30	0.65
Extrêmement tolérant au stress hydrique	0.35	0.70

Fermeture des stomates (stomatal closure): Des stomates s'avèrent beaucoup moins sensibles au stress hydrique comparés à la croissance expansive des feuilles. L'utilisateur spécifie l'effet du stress hydrique sur la transpiration de la culture en choisissant une classe de sensibilité (Tab. 2.9e2) ou en spécifiant des seuils d'épuisement de l'eau du sol (p) :

- p (upper/supérieur) : qui détermine l'eau du sol facilement disponible (RAW ; *readily available soil water*). RAW est la quantité maximale de l'eau qu'une culture peut extraire de sa zone racinaire sans inciter la fermeture des stomates et la réduction de la transpiration des cultures;
- p (lower/inférieur) : qui est fixé à 1.0 (c'est-à-dire TAW est complètement épuisée). Quand la fraction p (lower/inférieur) de la zone racinaire est épuisée, la teneur en eau du sol est au point de flétrissement permanent et la transpiration de la culture devient nulle.

Tableau 2.9e2 - Les classes et les valeurs par défaut correspondantes, pour le seuil supérieur d'épuisement d'eau du sol pour la fermeture des stomates

Classe Sensibilité au stress hydrique	Seuil supérieur d'épuisement d'eau du sol pour la fermeture des stomates (p_{sto})	
	Valeur par défaut	Plage
extrêmement sensible au stress hydrique	0.25	0.10 - 0.29
sensible au stress hydrique	0.45	0.30 - 0.49
modérément sensible au stress hydrique	0.55	0.50 - 0.59
modérément tolérant au stress hydrique	0.65	0.60 - 0.67
tolérant au stress hydrique	0.70	0.68 - 0.72
extrêmement tolérant au stress hydrique	0.75	0.73 - 0.90

Début de la sénescence de la canopée (*early canopy senescence*): Sous des conditions modérées à sévères de stress hydrique, la sénescence de feuille et canopée est déclenchée, réduisant ainsi la zone de feuillage transpirante. L'utilisateur spécifie l'effet de stress hydrique sur la sénescence de la canopée en sélectionnant une classe de sensibilité (*sensitivity class*) (Fig. 2.9e3), ou en spécifiant le seuil d'épuisement d'eau du sol

- p (upper/supérieur) : La fraction de l'eau du sol totalement disponible (TAW) qui peut être épuisée à partir de la zone racinaire avant que la sénescence de la canopée ne soit déclenchée;
- p (lower/inférieur) : qui est fixé à 1.0 (TAW est complètement épuisé). Lorsque la fraction p (inférieur) de la zone racinaire est épuisée, la teneur en eau du sol est au point de flétrissement et la sénescence de la canopée est à grande vitesse.

Le début de la sénescence de la canopée semble dépendre de la nutrition en azote de la plante. Lorsque l'azote est limité, la culture est supposée être plus sensible.

Tableau 2.9e3 - Les classes et les valeurs par défaut correspondantes, pour le seuil supérieur d'épuisement d'eau du sol pour la sénescence de la canopée

Classe Sensibilité au stress hydrique	Seuil supérieur d'épuisement d'eau du sol pour la fermeture des stomates (p_{sto})	
	Valeur par défaut	Plage
extrêmement sensible au stress hydrique	0.35	0.00 - 0.39
sensible au stress hydrique	0.45	0.40 - 0.49
modérément sensible au stress hydrique	0.55	0.50 - 0.59
modérément tolérant au stress hydrique	0.65	0.60 - 0.69
tolérant au stress en eau	0.75	0.70 - 0.75
extrêmement tolérant au stress hydrique	0.80	0.76 - 0.98

- **Effet du stress de salinité du sol sur les seuils d'épuisement en eau du sol**

Si la salinité des sols affecte le développement des cultures, les seuils pour l'expansion des feuilles, la conductance stomatique et le début de la sénescence de la canopée risquent de se déplacer vers le haut en raison d'une diminution du potentiel de l'eau du sol. Par le biais des paramètres de configuration du programme, l'utilisateur peut activer ou désactiver l'effet de la salinité du sol sur les seuils (Fig. 2.9e4).

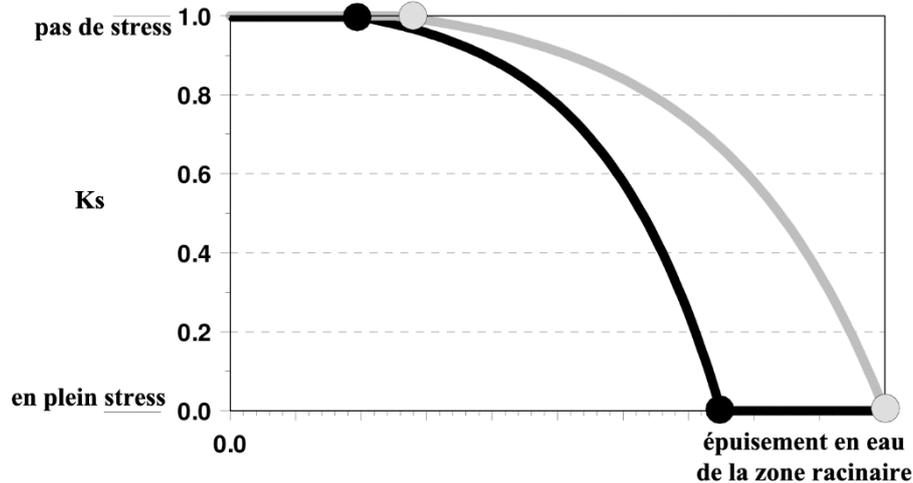


Figure 2.9e4 - Glissement des seuils d'épuisement de la zone racinaire (cercles) et son effet sur K_s (ligne) avec (noir) et sans (gris) effet de salinité du sol sur les seuils

- **Stress d'aération (aeration stress)**

Une saturation en eau provoque un stress qui affecte le développement et la croissance de la culture, à part le cas des espèces aquatiques comme le riz. Lorsque la teneur en eau du sol dans la zone racinaire dépasse le point d'anaérobioses (Fig. 2.9e5), l'aération de la zone sera déficiente, aboutissant à une diminution de la transpiration de la culture.

Le stress d'aération est spécifié par un coefficient K_s . A la saturation du sol (seuil supérieur) le stress est total et le K_s est égal à 0. En dessous d'un seuil inférieur de teneur en eau du sol, le stress hydrique n'est pas considéré et le K_s est égal à 1. Le seuil inférieur est la teneur en eau du sol au-dessous de la saturation à laquelle une faible aération ne limite plus la transpiration. Entre les seuils supérieurs et inférieurs la forme de la courbe de K_s est linéaire (Fig. 2.9e6). L'utilisateur spécifie la sensibilité de la culture à la saturation en eau en spécifiant une classe de stress d'aération (Tab. 2.9e4) ou en spécifiant le point d'anaérobie (volume en pourcentage au-dessous de la saturation du sol).

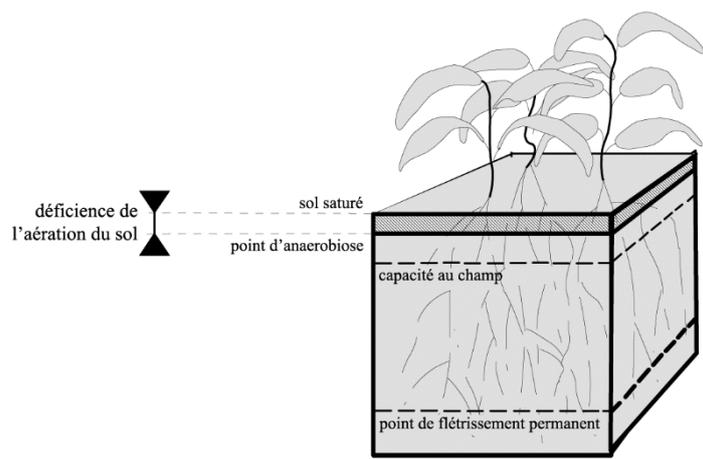


Figure 2.9e5 - Zone (zone sombre) d'extraction de l'eau du sol limitée en conséquence de la défiance de l'aération du sol

Tableau 2.9e4 - Classes, valeurs par défaut correspondantes et plages pour le stress d'aération

Classes	Point d'anaérobioses (% de volume au-dessous de la saturation)	
	Valeur par défaut	Plage
non stressé à la saturation	0	0
très tolérant à la saturation	-2 vol%	1 - 3
modérément tolérant à la saturation	-5 vol%	4 - 6
sensible à la saturation	-10 vol%	8 - 12
très sensible à la saturation	-15 vol%	13 - 15

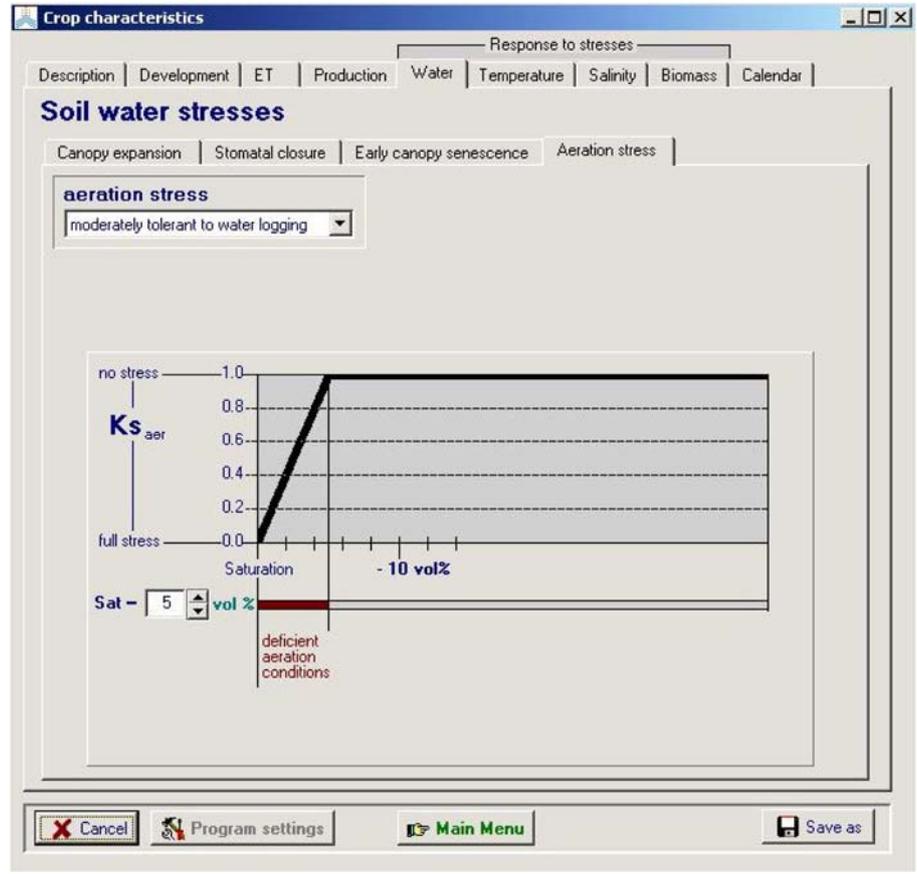


Figure 2.9e6 - Teneur en eau du sol au-dessous de la saturation à laquelle une faible aération (*aération stress*) ne limite plus la transpiration

- **Indice de récolte (*harvest index*)**

Le stress hydrique peut changer le HI, positivement ou négativement, de plusieurs manières, dépendant du moment, de la sévérité et de la durée du stress.

Avant la floraison (before flowering): Du stress hydrique pre-anthère limitant la croissance végétative peut avoir des effets positifs sur l'Indice de récolte. L'utilisateur spécifie l'augmentation maximale qui peut être considérée (Fig. 2.9e7) ou sélectionne une classe pour l'effet du stress hydrique pre-anthère (Tab. 2.9e5).

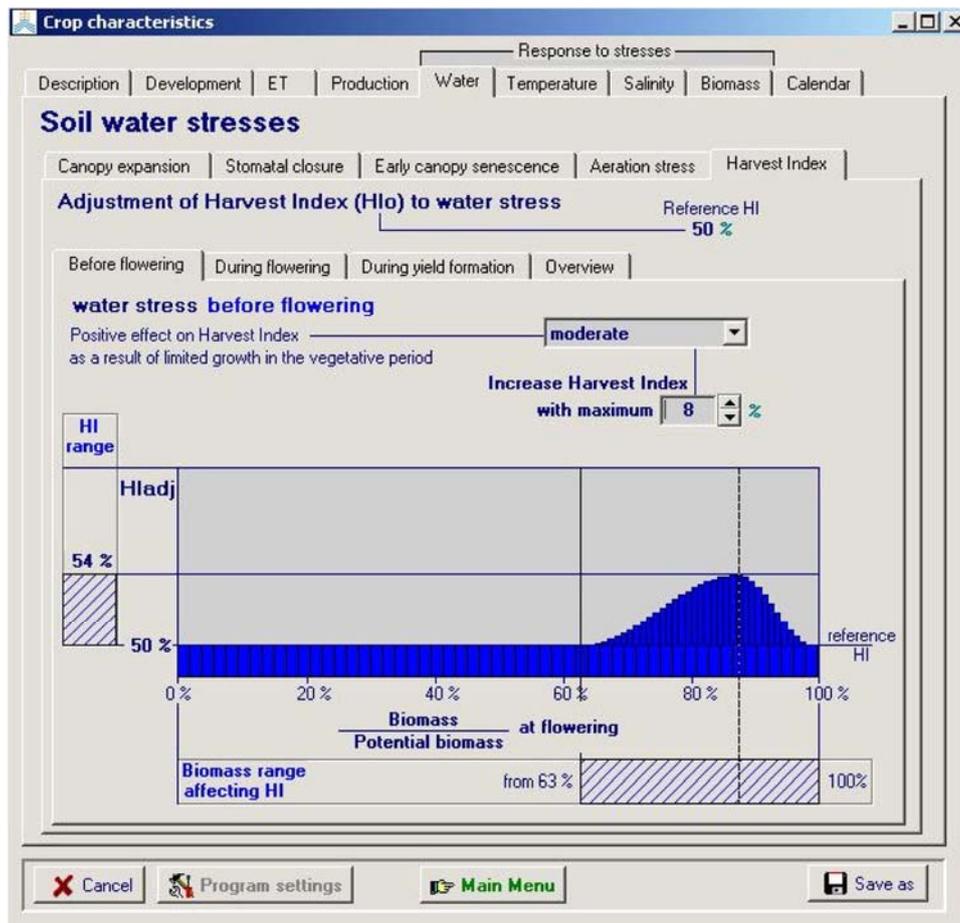


Figure 2.9e7 - Effet positif sur l'Indice de récolte du stress hydrique pre-anthère (*before flowering*) affectant la production de biomasse

Tableau 2.9e5 - Classes pour l'effet positif maximal du stress pre-anthère sur HI

Classe	Pourcentage d'augmentation du HI
Aucun	0 %
Petit	4 %
Modéré	8 %
Fort	12 %
Très fort	16 %

Pendant la floraison (*during flowering*): Lorsque le stress est très sévère et inhibe directement la pollinisation, l'effet sur HI est négatif pour une classe donnée de fruits potentiels excessifs, et sa magnitude est défini par un coefficient de stress hydrique (K_s). Le seuil d'échec de pollinisation, exprimé comme une fraction (p) de la TAW, est inférieur (plus fort que le niveau du stress) au seuil de fermeture des stomates et de déclenchement de la sénescence. Le coefficient de stress hydrique $K_{s_{pol}}$ diminue linéairement de 1 à 0 entre le seuil supérieur (p_{pol}) et le seuil inférieur (point de flétrissement permanent). L'utilisateur spécifie l'épuisement d'eau du sol (p) au seuil, ou sélectionne une classe pour une résistance relative à la sécheresse (Fig. 2.9e8, Tab 2.9e6).

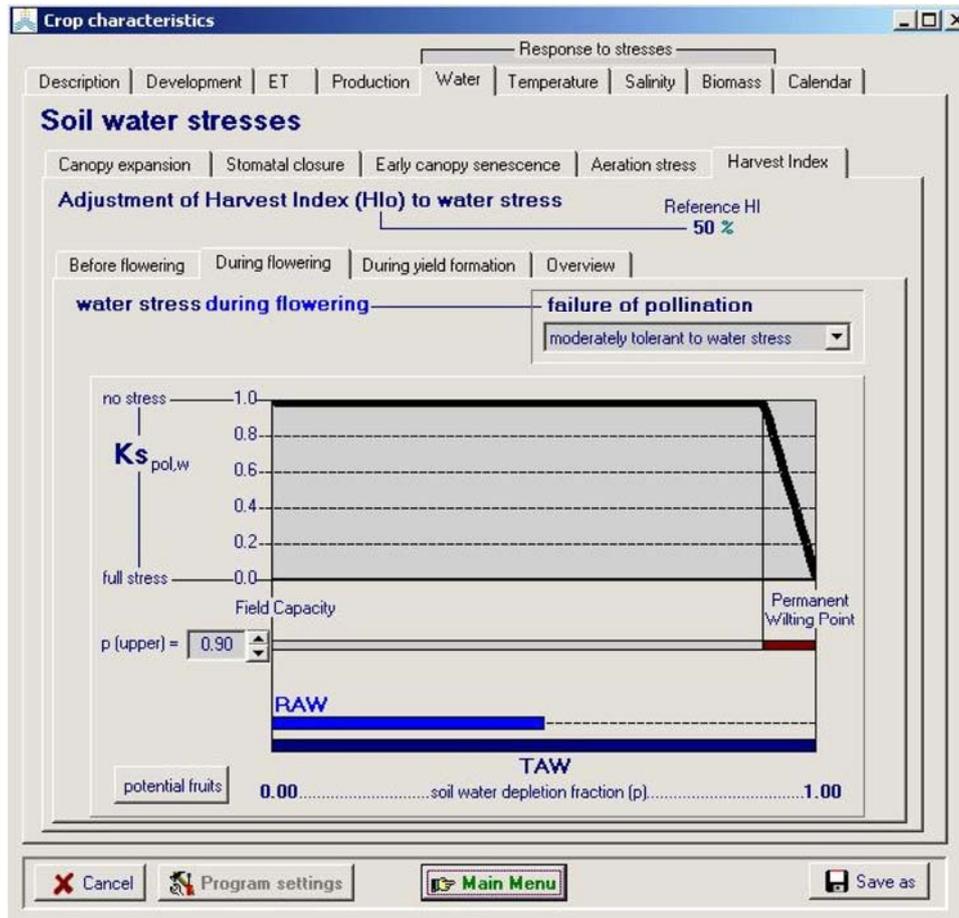


Figure 2.9e8 - Spécification des seuils supérieurs du stress hydrique pour l'échec de la pollinisation (*failure of pollination*)

Au cours de la formation du rendement (*during yield formation*): L'effet du stress hydrique pendant la formation du rendement peut être positif ou négatif selon la sévérité du stress :

- Un ajustement est pour la concurrence entre la croissance végétative et reproductive après le début de la floraison, lié à K_s pour la croissance des feuilles et avec un effet de stress positif sur HI. L'ampleur de cet effet, en fonction de K_s , et déterminée par un coefficient 'a', augmente si 'a' diminue (Fig. 2.9e7);
- Lorsque le stress est assez sévère pour causer la fermeture substantielle de stomates et la réduction de la photosynthèse, l'effet sur HI est supposé être négatif et lié à K_s pour les stomates. L'ampleur de cet effet est déterminé par le coefficient 'b', avec l'effet négatif sur HI qui s'accroît quand 'b' diminue (Tab. 2.9e8).

Tableau 2.9e6 - Classes, valeurs par défaut correspondantes et plages pour le facteur d'épuisement d'eau (p) pour l'échec de pollinisation

Classe Sensibilité au stress hydrique	Fraction d'épuisement d'eau du sol (p) pour l'échec de pollinisation	
	Valeur par défaut	Plage
extrêmement sensible au stress hydrique	0.76	0.75 - 0.77
sensible au stress hydrique	0.80	0.78 - 0.82
modérément sensible au stress hydrique	0.85	0.83 - 0.86
modérément tolérant au stress hydrique	0.88	0.87 - 0.90
tolérant au stress hydrique	0.92	0.91 - 0.93
extrêmement tolérant au stress hydrique	0.95	0.94 - 0.99

Tableau 2.9e7 - Classes, valeurs par défaut correspondantes et plages pour le coefficient 'a' (effet positif du stress sur HI)

Classe de sensibilité au stress hydrique	Coefficient 'a'	
	Valeur par défaut	Plage
aucun	-	-
petite	4	3 - 40
modérée	2	1.5 - 2.9
forte	1	0.75 - 1.40
très forte	0.7	0.50 - 0.70

Tableau 2.9e8 - Classes, valeurs par défaut correspondantes et plages pour le coefficient 'b' (effet négatif du stress sur HI)

Classe Sensibilité au stress hydrique	Coefficient 'b'	
	Valeur par défaut	Plage
aucun	-	-
petite	10	7.1 - 20
modérée	5	4.1 - 7.0
forte	3	1.6 - 4.0
très forte	1	1.0 - 1.5

En plus de la valeur de K_s , l'utilisateur spécifie le degré de fruits potentiels excessifs (Fig. 2.9e9). Lorsque les conditions sont favorables; les cultures fécondent beaucoup plus de fleurs et produisent plus de fruits que nécessaire pour le rendement maximal. Les jeunes fruits excessifs sont interrompus pendant que les vieux fruits grandissent. La réduction de HI, causé par des températures extrêmes ou des stress hydriques sévères survenus au cours de la pollinisation, dépend en partie du degré de cet excès au sein des reproducteurs potentiels. L'excès est indiqué en choisissant l'une des classes échelonnée du très petit au très large (Tab. 2.9e9).

L'effet combiné du stress hydrique pendant la formation du rendement est affiché dans l'onglet correspondant (Fig. 2.9e10).

Tableau 2.9e9 - Classes et valeurs par défaut correspondantes, pour l'excès de fruits potentiels

Excès de fruits potentiels	Excès de fruits
très petit	20
petit	50
moyen	100
grand	200
très grand	300

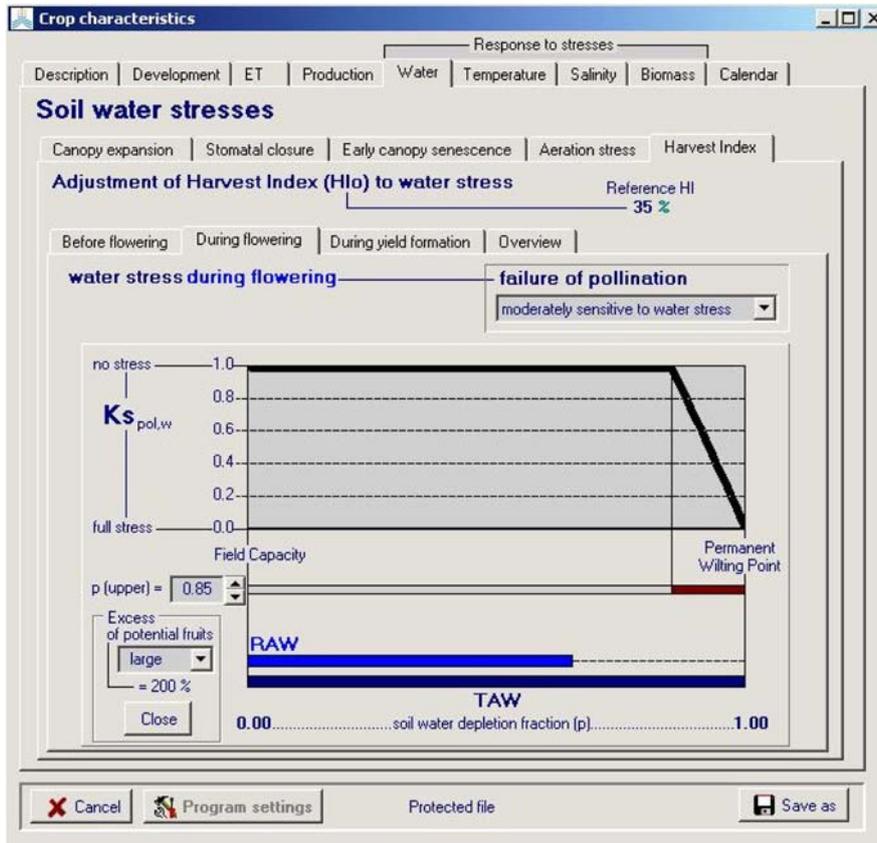


Figure 2.9e9 - Degré d'excès des fruits potentiels (*excess of potential fruits*)

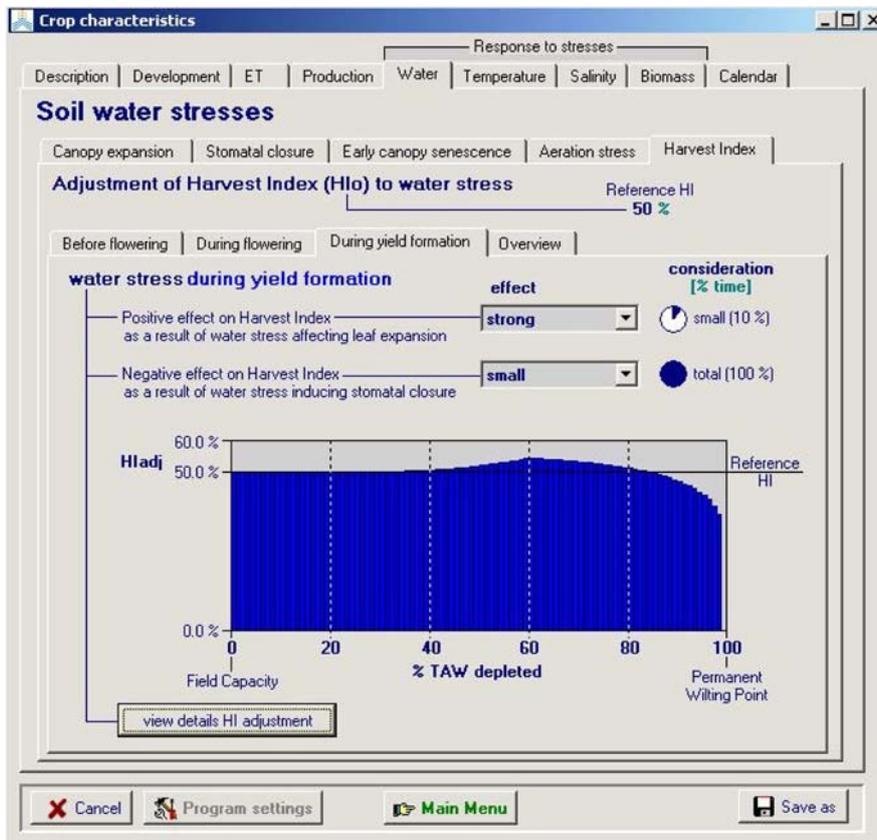


Figure 2.9e10 - L'effet sur l'Indice de récolte du stress hydrique post-anthère pour différents degrés d'épuisement de la zone racinaire (% TAW épuisé)

En sélectionnant la commande <voir détails d'ajustement de HI> (*view details HI adjustment*), l'utilisateur peut étudier l'effet individuel et combiné sur l'Indice de récolte du stress hydrique pendant la formation du rendement dans le menu *Ajustement de l'Indice de récolte* (*adjustment of harvest index*) (Fig. 2.9e11 et 2.9e12). L'effet individuel et combiné sur HI peut être affiché pour divers épuisements de la zone racinaire et demandes d'évaporation.

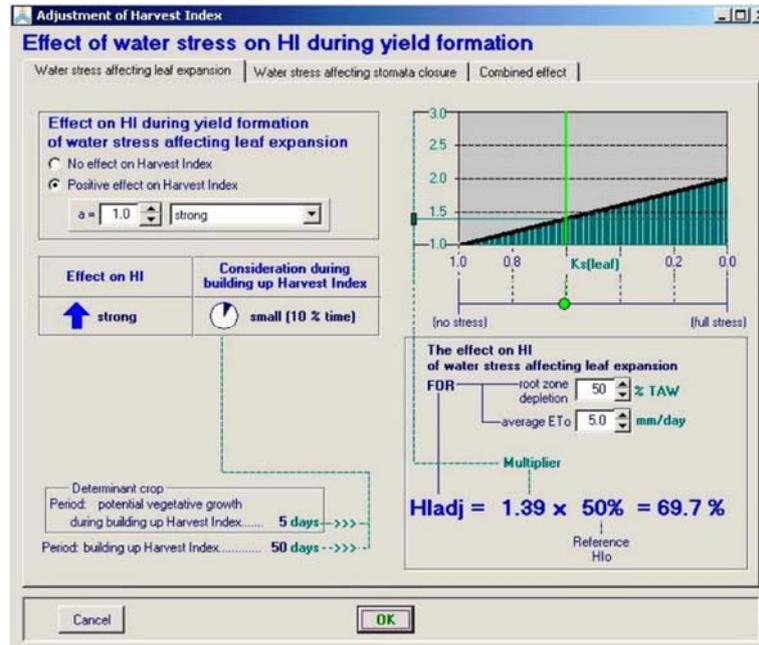


Figure 2.9e11 - Effet positif du stress hydrique sur l'Indice de récolte au cours de la période de croissance potentielle végétative. Pour les sélections suivantes : (i) coefficient 'a' ; (ii) épuisement de la zone racinaire ; (iii) demande évaporatoire

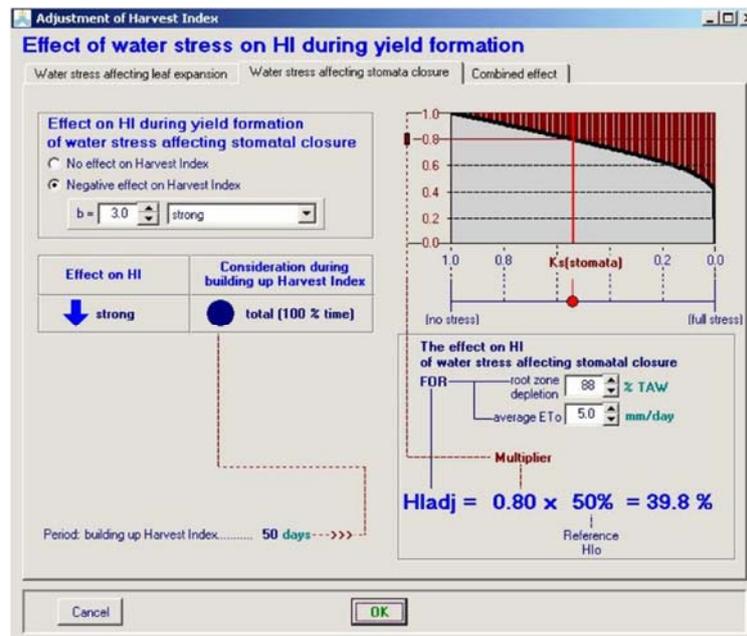


Figure 2.9e12 - Effet négatif du stress hydrique sur l'Indice de récolte pendant l'accroissement de l'Indice de récolte Pour les sélections suivantes : (i) coefficient 'B' ; (ii) épuisement de la zone racinaire ; (iii) demande évaporatoire

Vue d'ensemble (overview): Après la combinaison des divers effets du stress hydrique sur le HI, l'Indice de récolte ajusté devra rester inférieur à un maximum prédéfini. Dans l'onglet qui présente l'ensemble des effets du stress hydrique sur l'Indice de récolte, l'utilisateur peut ajuster la croissance maximale autorisée (Fig. 2.9e13).

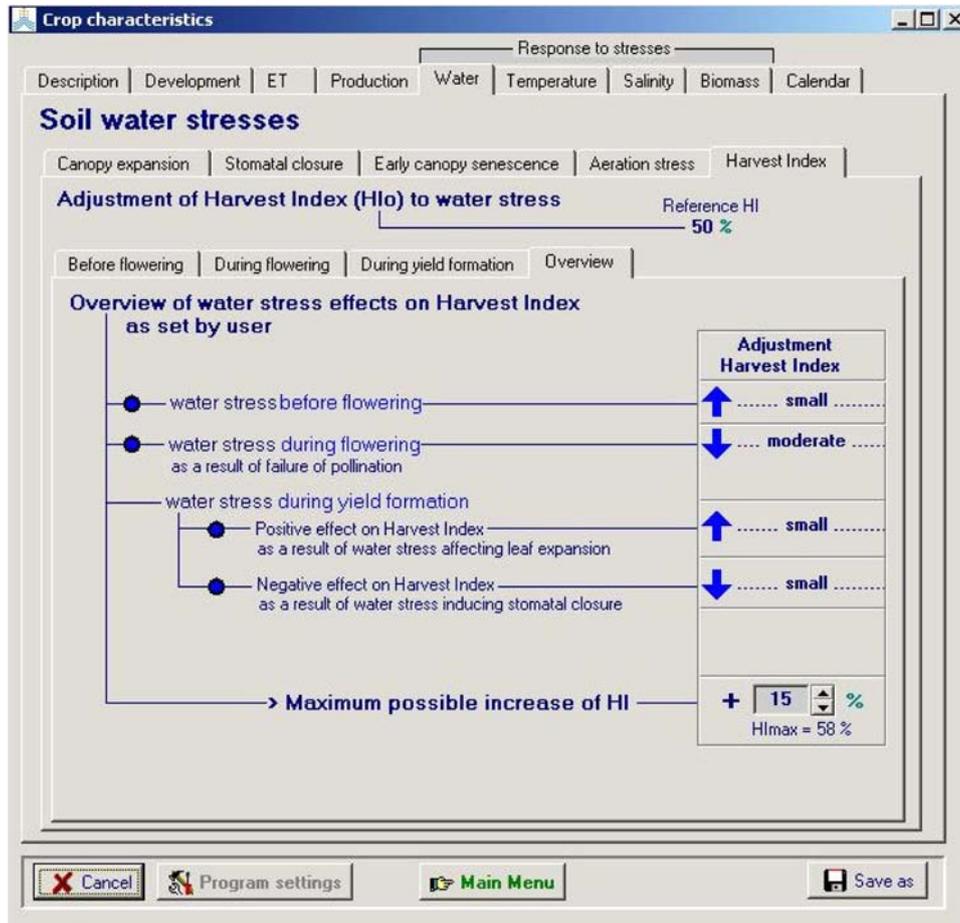


Figure 2.9e13 - Effets combinés du stress hydrique sur l'Indice de récolte

2.9.6 Stress de température

Dans AquaCrop, le stress de température sur la production de biomasse et la pollinisation est considéré. Les effets sont décrits par des coefficients de stress de température (K_s) qui varient entre 0 (stress total) et 1 (aucun stress).

- **Production de biomasse**

Des basses températures peuvent causer du stress qui affecte le développement et la croissance de la culture. AquaCrop considère l'impact des basses températures de deux manières. La première utilise DJC comme 'horloge' pour considérer les effets sur la phénologie, l'expansion de la canopée et le taux de déclin. En plus, il est nécessaire de considérer l'effet plus direct de stress de froid sur la production de biomasse. Cette dernière est définie par un coefficient K_s , qui varie entre 1 et 0, entre des seuils supérieur et inférieur définis en termes de DJC (Fig. 2.9f1). Le seuil inférieur est fixé à 0°C-jour. Entre le seuil supérieur et inférieur la forme de la courbe K_s est logistique.

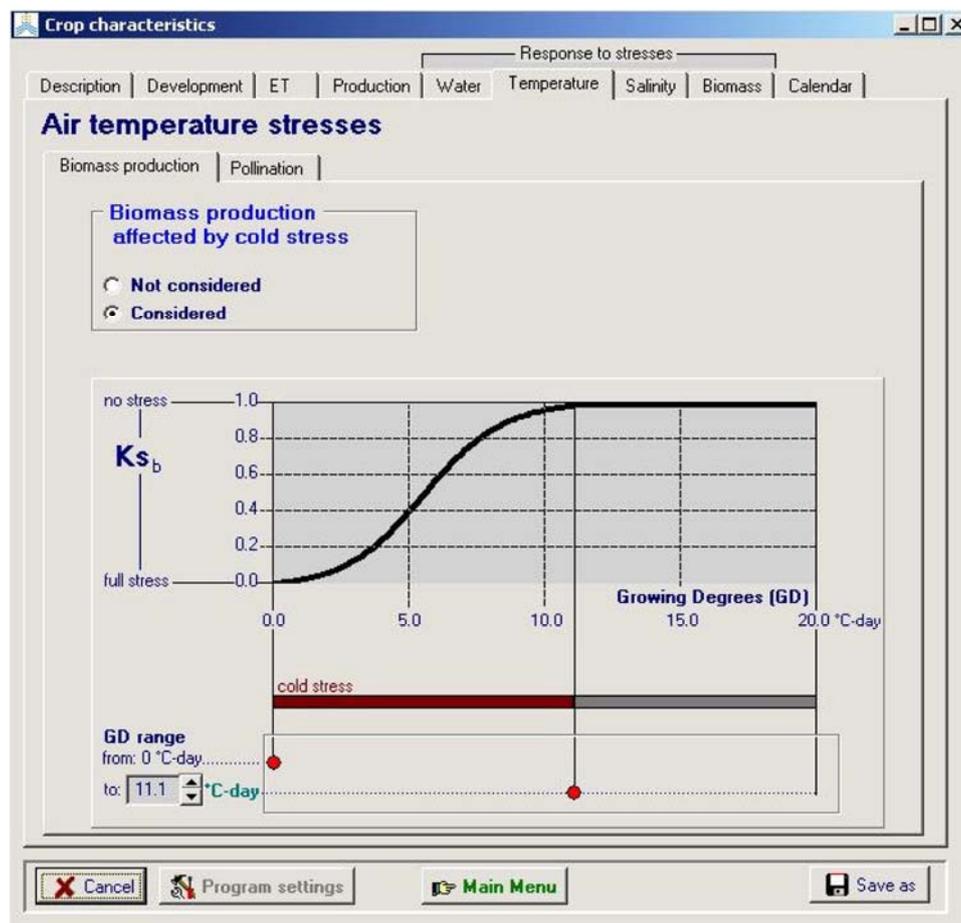


Figure 2.9f1 - Seuil pour le stress de température sur la production de biomasse
(*biomass production*)

- **Pollinisation**

Le stress dû au froid et à la chaleur pourrait influencer la pollinisation. Le stress de la température est spécifié par un coefficient K_s , qui varie de 0 à 1, entre des seuils de températures. Pour le stress dû au froid, K_s est égal à 0 au seuil inférieur et 1 au seuil supérieur de température. Pour le stress de la chaleur, K_s est égal à 1 au seuil supérieur et 0 au seuil inférieur de température (Fig. 2.9f2). Entre le seuil supérieur et inférieur les formes de courbes K_s sont logistiques.

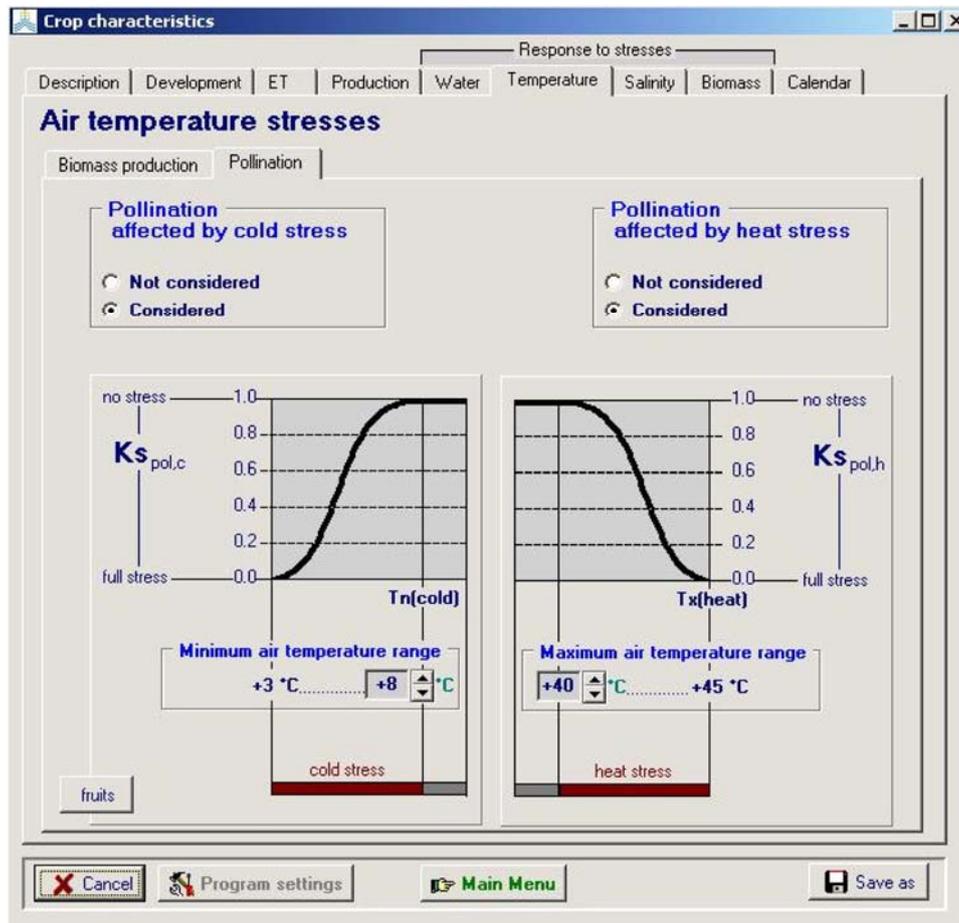


Figure 2.9f2 - Spécification des seuils pour le stress dû au froid et à la chaleur sur la pollinisation (*pollination*)

Seul le seuil supérieur pour la température minimale de l'air ($T_{n,cold}$) et le seuil inférieur pour la température maximale de l'air ($T_{x,heat}$), à laquelle la pollinisation commence à échouer, sont les paramètres de culture. $T_{n,cold}$ peut varier de 0 à +15°C et $T_{x,heat}$ de +30 à +45°C. Dans AquaCrop, il est supposé que le stress complet est atteint à 5°C ($K_s = 0$) en-dessous (stress dû au froid) ou au-dessus (stress dû à la chaleur) du seuil de température de l'air spécifié.

2.9.7 Stress de fertilité du sol

Bien que la réaction des cultures au stress de fertilité du sol soit basée sur des concepts fondamentaux, il est à présent décrit par une évaluation qualitative. Le stress d'éléments minéraux nutritifs, particulièrement la manque d'azote, peut (i) réduire l'expansion de la canopée, aboutissant à un développement plus lent de la canopée, et (ii) atteindre la couverture maximale de la canopée (CC_x), résultant dans une canopée moins dense. Sous un stress à long terme, (iii) CC subit normalement une baisse stable une fois que la CC_x ajustée est atteinte au milieu de la saison. Aussi, (iv) le stress de fertilité du sol réduit la productivité de l'eau (WP*).

- **Affichage des effets du stress de fertilité du sol**

Si la réponse de la culture est calibrée pour le stress de fertilité du sol, l'utilisateur peut voir les effets de différents niveaux de stress dans le menu **Caractéristiques culturelles** (*crop characteristics*): Pas de stress, stress moyen, stress modéré, et stress sévère (Fig. 2.9g).

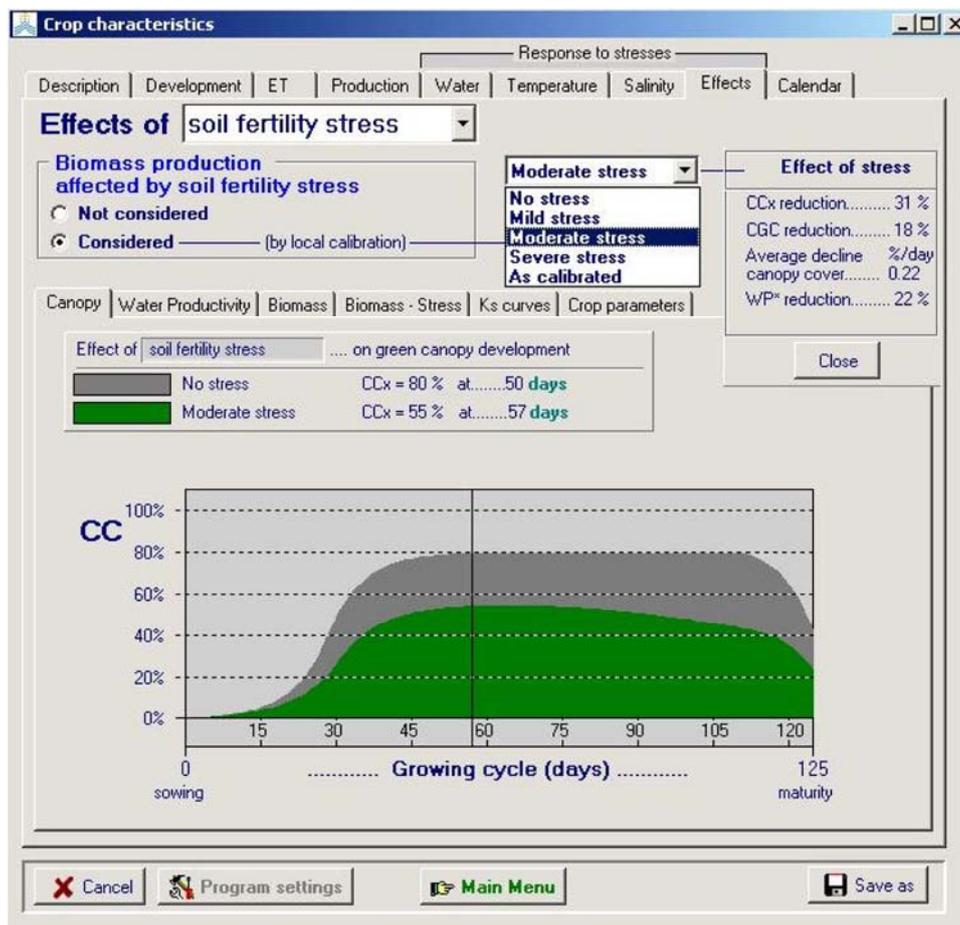


Figure 2.9g - Effet modéré du stress de la fertilité du sol sur le développement de la canopée

- **Simulation de l'effet du stress de fertilité du sol.**

Pour simuler l'effet du stress de fertilité du sol, l'utilisateur doit spécifier une des catégories de stress de fertilité du sol dans le menu de **Gestion de parcelle** (*field management*) (voir 2.12 Gestion de parcelle).

- **Calibration de la réponse d'une culture**

La calibration de la réponse des cultures au stress de fertilité du sol se fait dans le menu *Caractéristiques culturales* (*crop characteristics*) (voir 2.9.8 Calibration pour le stress de fertilité du sol).

2.9.8 Calibration pour le stress de fertilité du sol

Puisque la réponse de la culture est spécifique au type de stress et à l'environnement dans lequel la culture se développe, la réponse de la culture au stress de fertilité du sol ne peut être décrite avec des paramètres conservateurs de culture, mais doit être calibrée pour chaque cas spécifique.

- **Parcelle de référence et parcelle stressée**

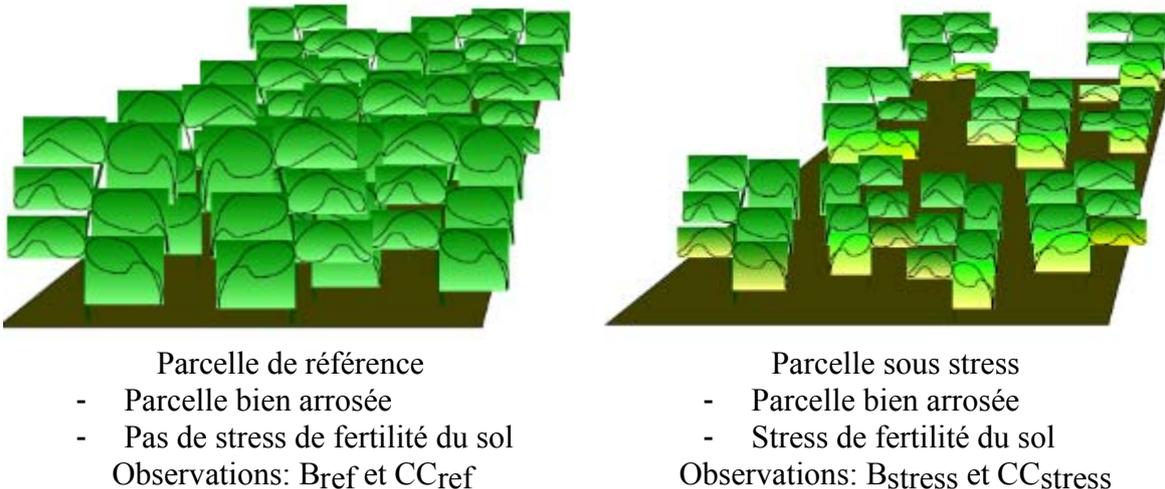


Figure 2.9h1 - La calibration de la réponse des cultures au stress de fertilité du sol est basée sur d'observations de terrain, des différences dans la production de Biomasse (B) et de la Couverture de la Canopée verte (CC) entre une parcelle de Référence et une parcelle Stressée.

La calibration, qui est faite dans le menu *Caractéristiques culturales* (*crop characteristics*), exige la couverture de la canopée verte (CC) et la production de biomasse (B) observées dans deux parcelles bien arrosées : une avec un stress de fertilité du sol et l'autre sans stress. La parcelle sans stress est considérée comme la 'Parcelle de Référence', tandis que la parcelle avec la fertilité du sol limitée est considérée comme la 'Parcelle sous Stress'. Les parcelles sont bien arrosées pour éviter l'effet de stress hydrique sur le développement de la culture et la production. La calibration exige que la culture dans la parcelle sous stress montre une réponse nette et claire à la fertilité du sol limitée (Fig. 2.9h1). La calibration consiste en la jonction d'une réduction observée de la biomasse au-dessus du sol (B) d'une parcelle stressée, et de la fertilité du sol limitée dans cette parcelle.

- **Réponse de la culture au stress de fertilité du sol**

La diminution observée de la biomasse est le résultat d'une intégration des effets de stress sur plusieurs processus. Le stress de la fertilité des sols influence :

- le développement de la canopée verte (CC), et indirectement la transpiration de la culture (Tr). L'effet du stress de la fertilité du sol sur CC consiste en:
 - la réduction de l'expansion de la canopée entraînant un développement plus lent de la canopée ;
 - une réduction de la couverture maximum de la canopée pouvant être atteinte (CC_x) résultant sur une canopée moins dense ;
 - la baisse régulière de CC une fois que CC_x ajustée est atteinte à mi-saison.
- la productivité de l'eau de la biomasse (WP *).

Le Tableau 2.9h liste les coefficients de stress (K_s) et les coefficients de déclin (f) utilisés pour la simulation de la réponse de la culture au stress de fertilité du sol.

Tableau 2.9h - Coefficients de stress pour simuler la réponse de la culture au stress de fertilité du sol

Coefficient	Description	Paramètre de culture ciblé
Pour simuler l'effet du stress de fertilité et de salinité du sol		
$K_{S_{exp,f}}$	Coefficient de stress pour l'expansion de la canopée	Coefficient de croissance de canopée (CGC)
$K_{S_{CCx}}$	Coefficient de stress pour la couverture maximum de la canopée	Couverture maximum de la canopée (CCx)
$f_{CDecline}$	Coefficient de stress pour le déclin de la couverture de la canopée	Couverture de la canopée (CC) lorsque la couverture maximale de la canopée est atteinte
Pour simuler l'effet du stress de fertilité du sol		
$K_{S_{WP}}$	Coefficient de stress pour la productivité de l'eau de la biomasse	Productivité de l'eau de la biomasse (WP*)

- L'effet de stress sur la biomasse n'est pas considéré (pas calibré)

Processus de calibration

Les fichiers protégés de culture (fournis par la FAO) ne considèrent pas l'effet de stress de fertilité du sol sur la biomasse, et ont besoin d'être calibrés avant que l'effet ne soit simulé (Fig. 2.9h2).



Figure 2.9h2 - Présentation dans le menu de *Caractéristiques culturales (crop characteristics)* d'une culture pour laquelle l'effet de stress de fertilité du sol sur la biomasse n'est pas considéré

En sélectionnant 'Considéré' dans l'onglet du menu *Caractéristiques culturales* (crop characteristics) (Fig. 2.9h2), AquaCrop affichera le menu *Calibration de stress de fertilité du sol* (calibration soil fertility stress) dans lequel la calibration peut être démarrée (Fig. 2.9h3).

Dans l'onglet 'Observations de terrain' du menu *Calibration de fertilité du sol* (calibration soil fertility stress) (Fig. 2.9h3), l'utilisateur spécifie (référence à Fig. 2.9h1) les observations constatées sur le terrain dans la parcelle stressée:

1. la production relative de Biomasse observée, en sélectionnant une classe (variant de 'presque optimal' à 'très faible'), ou en spécifiant la biomasse relative observée ($100 B_{\text{stress}}/B_{\text{ref}}$);
2. la couverture maximale de la canopée observée (CC_x), en sélectionnant une classe (variant de 'proche de la référence' à 'très fort réduite') ou en spécifiant la CC_x observée ($CC_{x\text{stress}}$);
3. le déclin de la canopée observé dans la saison une fois que CC_x est atteinte, en sélectionnant une classe (variant de 'petite' à 'forte').

Figure 2.9h3 - Observations de terrain de la parcelle en état de stress dans le menu *Calibration de stress de fertilité du sol* (calibration soil fertility stress)

En cliquant sur le bouton <Démarrer> (start) dans l'onglet 'Observations de terrain' (field observations) du menu *Calibration de stress de fertilité du sol* (calibration soil fertility stress) (Fig. 2.9h3), AquaCrop choisit des valeurs pour les coefficients de stress ($K_{S_{\text{exp},f}}$, $K_{S_{CCx}}$, $K_{S_{WP}}$, $f_{C_{\text{Decline}}}$) et modifie la couverture de la canopée verte simulée (CC) et la productivité de l'eau de la biomasse (WP^*) pour la parcelle en état de stress.

En essayant différentes valeurs pour les différents coefficients de stress, et en respectant les observations spécifiées (Fig. 2.9h3), AquaCrop calcule pour chaque série de coefficients de

stress, le CC_{stress} et la production de biomasse (B_{stress}) correspondants jusqu'à ce que la production relative de la biomasse simulée soit égale à la production relative observée sur la parcelle en état de stress. Les résultats sont présentés dans l'onglet 'Réponse de la culture au stress de fertilité du sol' (crop response to soil fertility stress) (Fig. 2.9h4).

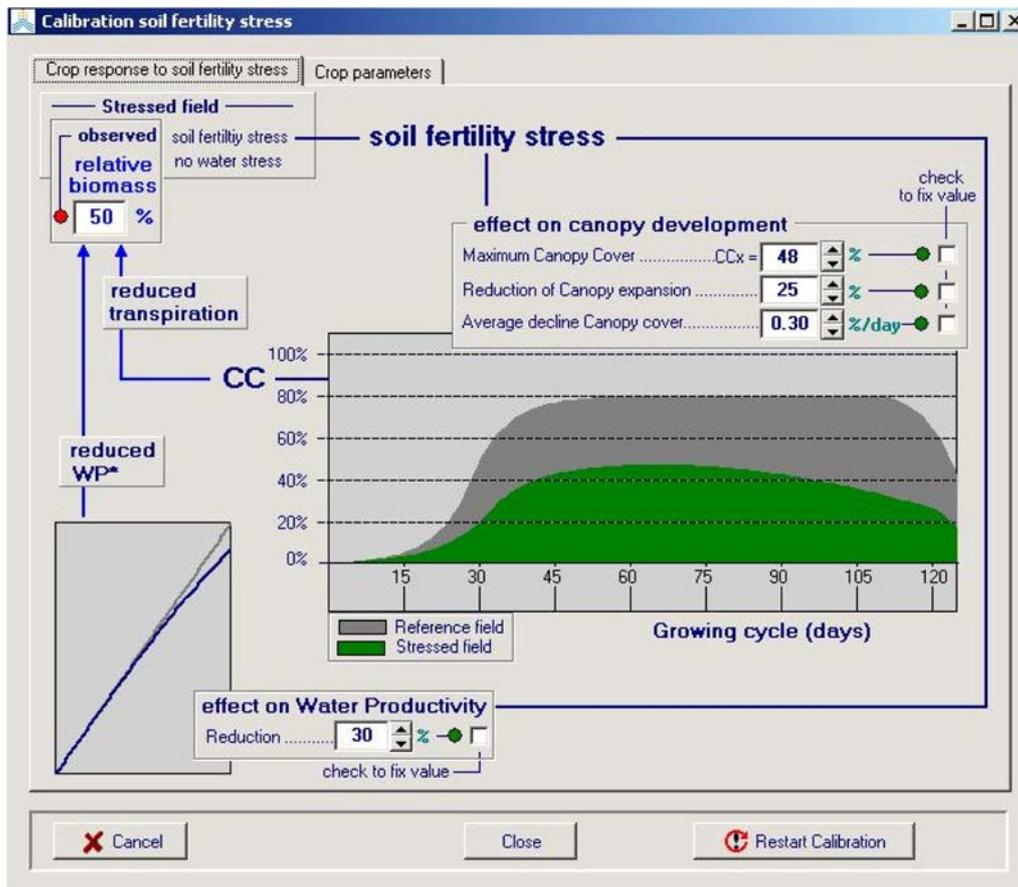


Figure 2.9h4 - La biomasse relative simulée (similaire à celle observée dans la parcelle en état de stress), obtenue en considérant l'effet de stress de fertilité du sol sur (i) le développement de la canopée (couverture maximale de la canopée, expansion et déclin de la canopée), et (ii) la productivité de l'eau de la biomasse (WP^*), présentée dans l'onglet 'Réponse de la culture au stress de fertilité du sol' (crop response to soil fertility stress) du menu *Calibration du stress de fertilité du sol* (calibration soil fertility stress)

Dans l'onglet 'Paramètres de culture' du menu *Calibration du stress de fertilité du sol* (calibration soil fertility stress), la réduction du développement de la canopée et de la productivité de l'eau de la biomasse (WP^*) sont présentées. La simulation de la production relative de biomasse, les 4 courbes K_s , et les paramètres de culture (ajustés au stress), peuvent aussi bien être consultés dans leurs onglets respectifs (Fig. 2.9h5).

La calibration détermine la forme des 3 courbes K_s , et du coefficient de déclin (f). La forme est donnée par les valeurs de K_s ou f , à 3 différents niveaux de stress :

1. Pour une fertilité du sol non-limitée (qui n'affecte pas la production de biomasse), le stress est à 0 % et les 3 coefficients de stress de fertilité du sol (K_s) sont égal à 1, et le coefficient de déclin (f_{Decline}) est zéro;

2. Lorsque le stress de fertilité du sol est total (100% de stress), la production agricole n'est plus possible, les coefficients K_s sont nuls et le coefficient de déclin ($f_{CDecline}$) est à son taux maximum, c'est à dire 1% par jour ;
3. Le stress sur la parcelle en état de stress est défini comme :

$$Stress = 100 (1 - B_{rel}) \quad (\text{Eq. 2.9})$$

où B_{rel} est le ratio entre la biomasse dans la parcelle de référence et celle en état de stress ($B_{rel} = B_{stress}/B_{ref}$). En considérant l'effet sur ses paramètres ciblés (CC_x , CGC, WP^* et le déclin de canopée), les valeurs correspondantes pour K_s et f sont obtenues pour le niveau de stress défini. Par exemple, lorsque B est réduit sur la parcelle en état de stress de 50% ($B_{stress} = 0.5 B_{ref}$) et CC_x de 40 % ($CC_{xstress} = 0.6 CC_{xref}$), K_{sCC_x} est 0.6 à un stress de fertilité/salinité de 50 % (Fig. 2.9h5).

Lorsqu'une courbe est calibrée, le K_s correspondant à d'autres niveaux de stress de fertilité/salinité peut être obtenu de la courbe. En référence à la figure 2.9h5, CC_x sera réduit de 20% ($K_{sCC_x} = 0.80$ ou $CC_x = 0.8 CC_{xref}$) pour un stress de fertilité du sol de 27%, et de 60% ($K_{sCC_x} = 0.40$ ou $CC_x = 0.4 CC_{xref}$) pour un stress de 69 %.

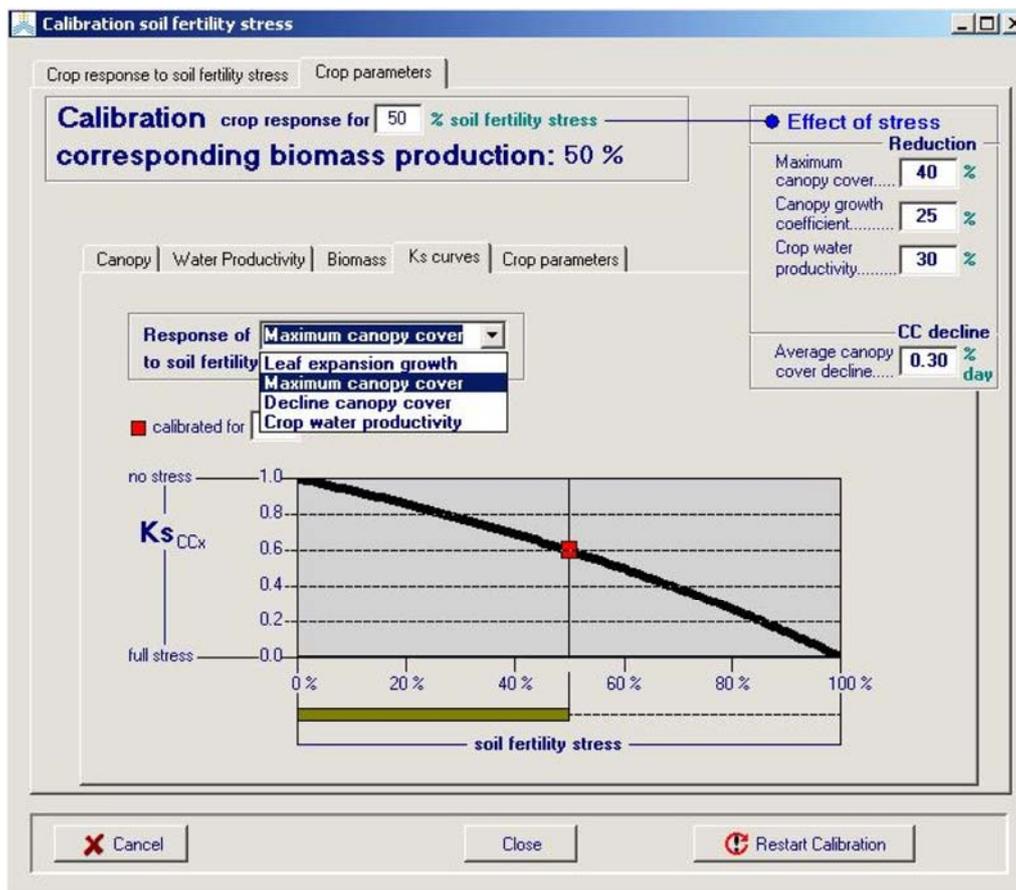


Figure 2.9h5 - La courbe K_s pour la couverture maximale de la canopée comme présentée dans l'onglet 'Courbes K_s ' du menu *Calibration du stress de fertilité du sol (calibration soil fertility stress)*

Mise au point

L'utilisateur peut régler la calibration en changeant dans le menu *Calibration de stress de fertilité du sol* (*calibration soil fertility stress*) (Fig. 2.9h4) : (i) la couverture maximale de la canopée (CCx), (ii) la réduction de l'expansion de la canopée, (iii) le déclin moyen de la couverture de la canopée, ou (iv) la réduction de la productivité de l'eau de la biomasse (WP *). La modification de l'une des réductions ci-dessus changera les réductions des autres paramètres puisque AquaCrop cherche toujours l'équilibre entre la production relative de biomasse simulée et observée dans la parcelle en état de stress. En cliquant sur une ou plusieurs des 4 cases, l'utilisateur peut fixer la valeur d'un ou de plusieurs paramètres (Fig. 2.9h4).

En cliquant sur le bouton **<Redémarrer la calibration>** (*restart calibration*) dans la fenêtre de commande du menu *Calibration de stress de fertilité du sol* (*calibration soil fertility stress*), l'utilisateur retourne à l'onglet 'Observation de terrain' (*field observagion*) (Fig. 2.9h3).

- L'effet de stress sur la biomasse est considéré (calibré)

Relation entre la Biomasse et le stress de fertilité du sol

Pour les fichiers de culture où l'effet de stress de fertilité du sol sur la biomasse est considéré, AquaCrop présente dans le menu *Caractéristiques culturales* (*crop characteristics*), l'effet sur le développement de la canopée, la productivité de l'eau de la biomasse et la production de biomasse pour plusieurs niveaux de stress (stress moyen à stress sévère). Dans le menu, la relation entre la Biomasse et le stress de fertilité du sol est aussi affichée (Fig. 2.9h6).

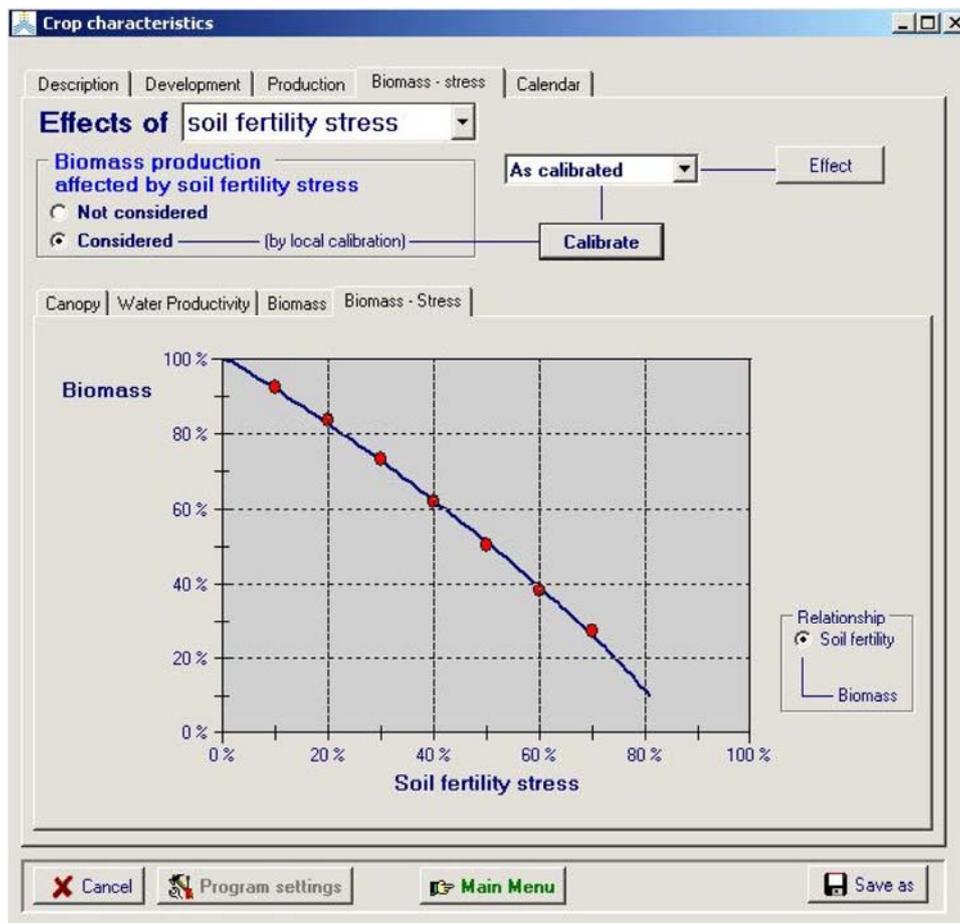


Figure 2.9h6 - Présentation de la relation entre la biomasse et le stress de fertilité du sol dans l'onglet 'Biomasse-Stress' du menu *Caractéristiques culturales* (*crop characteristics*)

Les relations sont obtenues:

- i. en considérant divers niveaux de stress de fertilité du sol, l'effet individuel sur CCx, CGC, le déclin de canopée et WP*, comme décrit dans chacune des courbes Ks (Fig. 2.9h5); et
- ii. en calculant, en considérant les coefficients de stress, le développement de la canopée correspondante, et la réduction de la production relative de Biomasse en supposant qu'il n'y a pas de stress hydrique. L'effet de chaque niveau de stress de fertilité du sol sur CCx, CGC, le déclin de canopée, et sur WP* sont décrit dans les différentes courbes calibrées de Ks et de réduction (Fig. 2.9h5). Comme les tailles des courbes Ks ne sont pas identiques, et que l'effet de stress sur WP* augmente quand la couverture de canopée diminue, la relation de B - stress n'est pas linéaire.

Mise au point

Pour les fichiers de culture où l'effet de stress de fertilité du sol sur la biomasse est considéré, la calibration peut être affinée en cliquant sur le bouton **<Calibration>** (*calibrate*) dans le menu **Caractéristiques culturales** (*crop characteristics*) qui permettra d'afficher le menu **Calibration du stress de fertilité du sol** (*calibration soil fertility stress*) (Fig. 2.9h4 et 2.9h5).

En cliquant sur le bouton **<Redémarrer la calibration>** (*restart calibration*) dans la fenêtre de commande du menu **Calibration de stress de fertilité du sol** (*calibration soil fertility stress*), l'utilisateur retourne au tableau 'Observation de terrain' (*field observation*) (Fig. 2.9h3).

2.9.9 Stress de salinité du sol

- **Courbe K_s**

La production de biomasse pourrait être affectée par le stress de salinité du sol. Pour décrire ce processus, le coefficient du stress de salinité du sol ($K_{s\text{salt}}$) est considéré, variant entre 0 (effet complet de stress de salinité du sol) et 1 (aucun effet). La conductivité électrique moyenne d'un extrait de pâte saturée de sol (EC_e) de la zone racinaire est l'indicateur pour le stress de salinité du sol.

Seuils (thresholds): L'utilisateur spécifie l'effet de stress de salinité du sol en choisissant une classe de sensibilité, ou en spécifiant des valeurs pour un seuil supérieur et inférieur pour la salinité du sol dans la zone racinaire (Tab. 2.9i; Fig. 2.9i1). Les seuils sont spécifiques à la culture (voir Annexe III) et sont donnés par les conductivités électriques d'extraits de pâtes saturées de sol (EC_e) et exprimé en deciSiemens par mètre (dS/m). La distinction est faite entre:

- le seuil inférieur (EC_{en}) auquel le stress de salinité du sol commence à affecter la production de biomasse, et
- le seuil supérieur (EC_{ex}) auquel le stress de salinité du sol a atteint son effet maximal et le stress devient si sévère que la production de biomasse cesse.

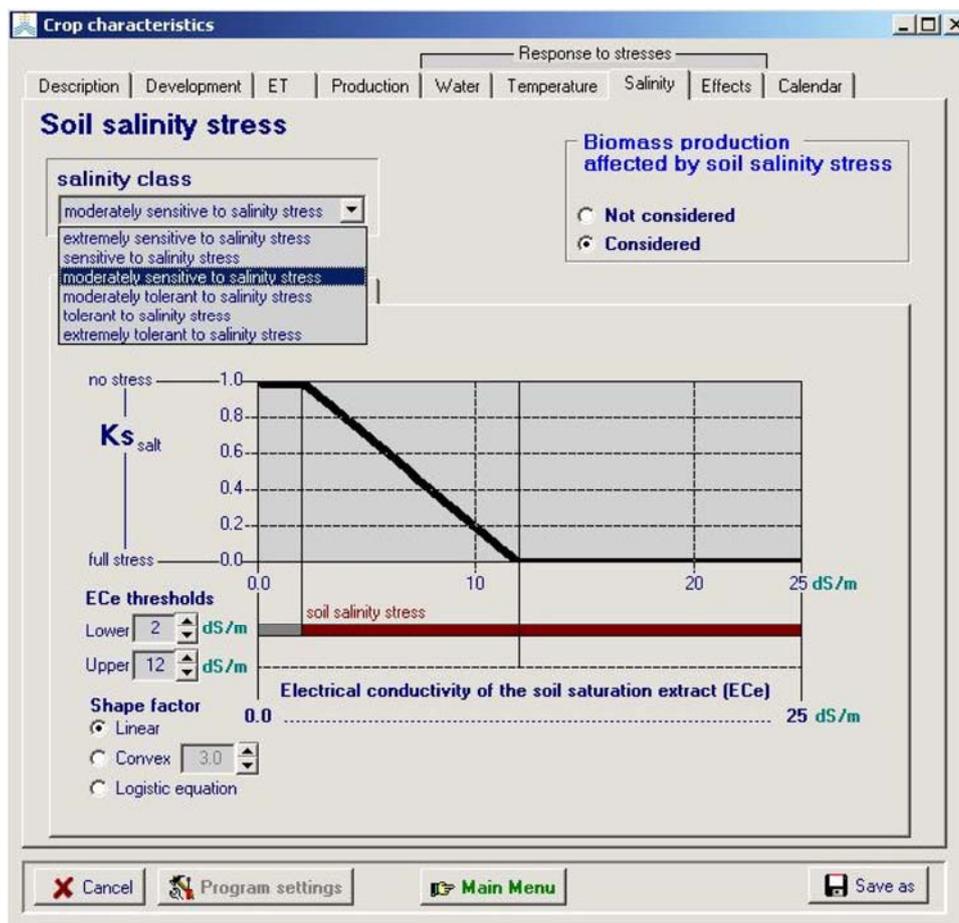


Figure 2.9i1 - Spécification des seuils supérieur (*upper*) et inférieur (*lower*) et la forme de la courbe (*shape factor*) $K_{s\text{salt}}$ pour l'effet de stress de salinité du sol sur la production de biomasse

Tableau 2.9i - Classes et valeurs par défaut correspondantes pour les seuils inférieur (EC_{e_n}) et supérieur (EC_{e_x}) de stress de salinité du sol

Classe Sensibilité au stress hydrique	Conductivité électrique d'extraits de pâte saturée de sol (EC_e) en dS/m	
	EC_{e_n}	EC_{e_x}
extrêmement sensible au stress de salinité	0	6
sensible au stress de salinité	1	8
modérément sensible au stress de salinité	2	12
modérément tolérant au stress de salinité	5	18
tolérant au stress de salinité	7	25
extrêmement tolérant au stress de salinité	8	37

Forme de la courbe K_s (*shape of K_s curve*): Entre le seuil supérieur et inférieur des extraits de pâte saturée de sol, la forme de la courbe K_s détermine la magnitude de l'effet de stress de salinité sur la production de biomasse. La forme peut être linéaire, convexe ou logistique (Fig. 2.9i2). Pour les formes convexes, le facteur de forme peut varier de + 6 (fortement convexe) à 0 (linéaire).

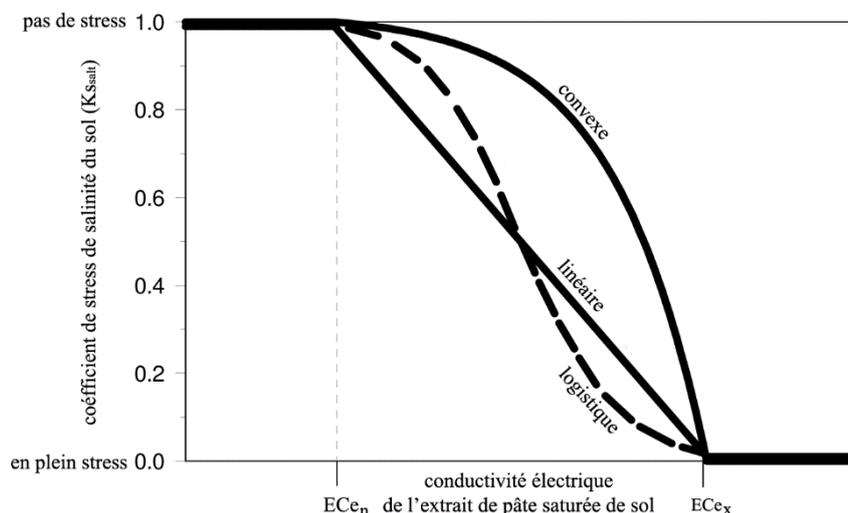


Figure 2.9i2 - Formes linéaires, convexes et logistiques de la courbe de K_s

- **Présentation des effets de stress de salinité du sol**

Le stress de salinité du sol peut réduire l'expansion de la canopée et la couverture maximale de la canopée qui peut être atteinte (CC_x). De plus, sous de longues périodes de stress, CC subit normalement un déclin stable une fois que CC_x ajustée est atteinte à mi-saison. Plus loin, le stress de salinité du sol incite la fermeture des stomates.

Comme mentionné dans l'onglet '*effets de stress de salinité du sol*' (Fig. 2.9i3), la simulation des effets de salinité du sol sur le développement de la canopée et la production agricole est toujours dans une phase de test. En cliquant sur le bouton **<Effets de stress de salinité du sol>** (*effects of soil salinity stress*), les effets de salinité du sol s'affichent (Fig. 2.10j1). Dans cet onglet, l'utilisateur peut voir l'effet de divers niveaux de stress (si la réponse de la culture au stress de salinité du sol est calibrée), et/ou calibrer la réponse de la culture au stress.

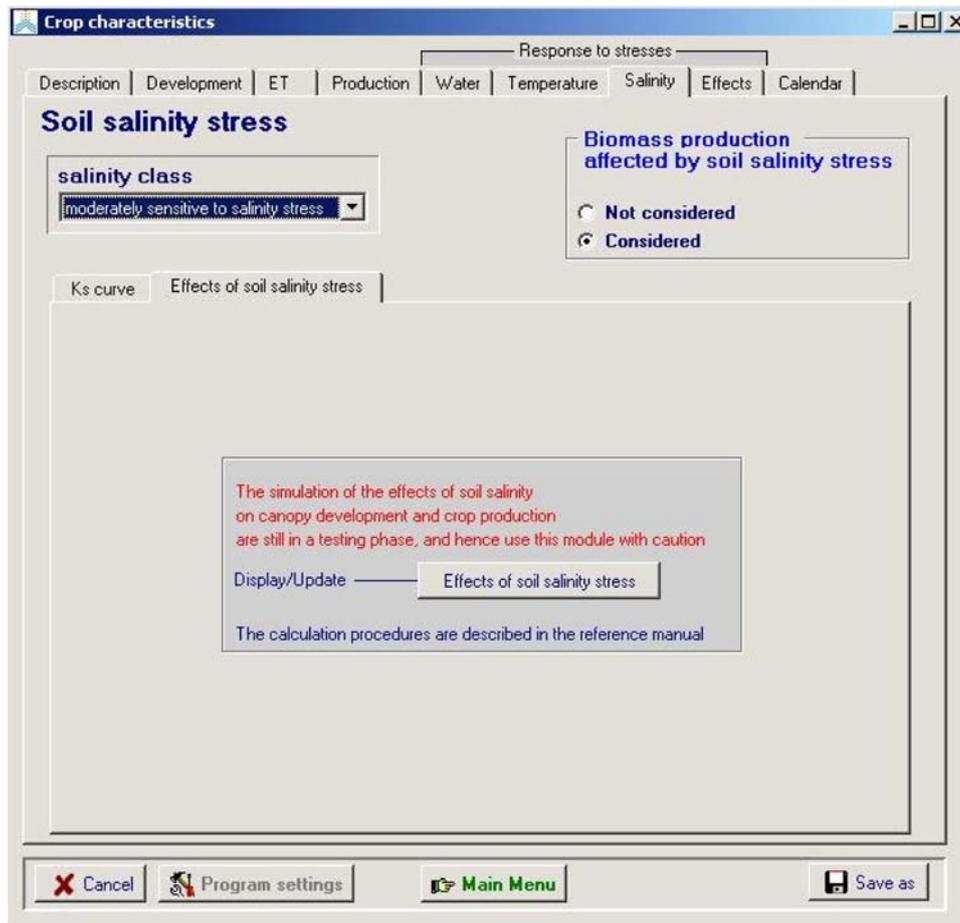


Figure 2.9i3 - Informations concernant l'effet de stress de salinité du sol (*soil salinity stress*)

- **Calibration de la réponse de la culture**

La calibration de la réponse de la culture au stress de salinité du sol est faite dans le menu *Caractéristiques culturales* (*crop characteristics*) (Voir 2.9.10 Calibration pour le stress de salinité du sol).

2.9.10 Calibration pour le stress de salinité du sol

- Réponse de la culture au stress de salinité du sol

Le stress de salinité du sol réduit la production de biomasse (B). La conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée de sol (ECe) de la zone racinaire détermine la valeur du coefficient de stress de salinité du sol $K_{S_{salt}}$ (Fig. 2.9i1). Comme expliqué en Chapitre 3 (3.15 Simulation de l'effet de stress de salinité du sol), $K_{S_{salt}}$ exprime le degré de stress de salinité du sol et de là, détermine la réduction totale de la production de biomasse. La réduction de la production de biomasse est le résultat de la fermeture des stomates, et d'un pauvre développement de canopée (lente expansion de la canopée, pauvre couverture de la canopée, et déclin de la canopée au cours du cycle de la culture). Quoique la réduction totale de la biomasse (déterminée par $K_{S_{salt}}$) et les causes de sa réduction soient connues, l'effet individuel du stress de salinité sur chacun des processus n'est pas encore suffisamment documenté pour la simulation dans AquaCrop.

Avec l'absence de tests, la réduction dans la production de biomasse due au stress de salinité du sol est décrite de manière similaire à l'effet de stress de fertilité du sol sur B. La calibration pour le stress de salinité du sol est donc identique à la calibration pour le stress de fertilité du sol (2.9.8 Calibration pour le stress de fertilité), et requiert l'observation de la couverture de la canopée verte (CC) et la production de biomasse (B) dans deux parcelles bien arrosées: l'une avec, et l'autre sans stress de salinité du sol. La parcelle sans stress est considérée comme 'Parcelle de Référence', tandis que celle avec le stress de salinité est dénotée comme 'Parcelle sous stress'. Les parcelles sont bien arrosées pour éviter l'effet de stress hydrique sur le développement et la production de la culture. La calibration nécessite que la culture dans la parcelle sous stress montre une réponse nette au stress de salinité du sol (Fig. 2.9j1).

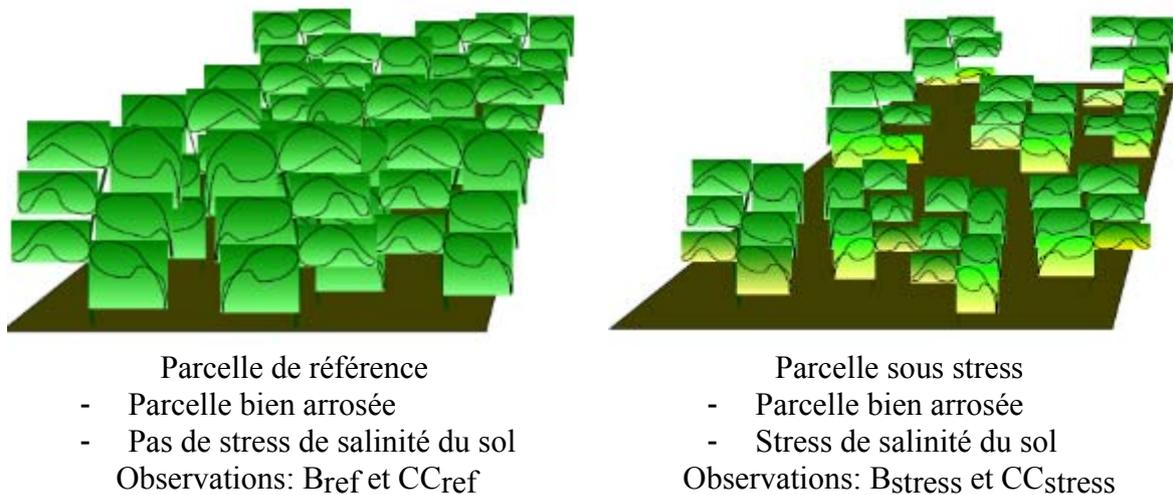


Figure 2.9j1 - La calibration de la réponse de la culture au stress de salinité du sol est basée sur les observations de terrain des différences dans la production de biomasse (B) et la couverture de la canopée verte (CC) entre une parcelle de référence et une autre en état de stress.

La réduction de la biomasse observée est le résultat d'une intégration des effets de stress sur plusieurs processus. Comme expliqué dans la section 2.9.8 (Calibration de stress de fertilité du sol), le stress de fertilité sol influence le développement de la canopée verte (CC), et donc indirectement la transpiration de la culture (T_r) et la productivité de l'eau de la biomasse (WP^*).

Le stress de salinité du sol influence de manière similaire le développement de la canopée verte (CC), et donc la productivité de l'eau de la biomasse (WP*), mais il influence aussi directement la transpiration de la culture en provoquant la fermeture des stomates. Dans le tableau 2.9j, des coefficients de stress (Ks) et de déclin (f) utilisés pour la simulation de la réponse de la culture au stress de salinité du sol sont présentés.

Tableau 2.9j - Coefficients de stress pour la simulation de la réponse de la culture au stress de salinité du sol

Coefficient	Description	Paramètre de culture ciblé
Pour simuler l'effet du stress de fertilité et de salinité du sol		
$K_{S_{exp,f}}$	Coefficient de stress pour l'expansion de la canopée	Coefficient de croissance de canopée (CGC)
$K_{S_{CCx}}$	Coefficient de stress pour la couverture maximale de la canopée	Couverture maximale de la canopée (CCx)
$f_{C_{Decline}}$	Coefficient de stress pour le déclin de la couverture de la canopée	Couverture de la canopée (CC) lorsque la couverture maximale de la canopée est atteinte
Pour simuler l'effet du stress de salinité du sol		
$K_{S_{WP}}$	Coefficient de stress pour la fermeture des stomates	Transpiration de la culture (Tr)

Dans le cas d'absence de tests, les effets du stress de fertilité du sol et de salinité du sol sont supposés être identiques. Alors $K_{S_{exp,f}}$, $K_{S_{CCx}}$ and $f_{C_{Decline}}$ sont utilisés pour simuler les effets de stress de fertilité ainsi que de stress de salinité du sol.

- **Effet de stress sur la biomasse n'est pas encore considéré**

Processus de calibration

En sélectionnant '*Considéré*' (*considered*) dans l'onglet '*Effets*' (*effects*) du menu *Caractéristiques culturales* (*crop characteristics*) (Fig. 2.9j2), AquaCrop affichera le menu *Calibration de stress de salinité du sol* (*calibration soil salinity stress*) à partir duquel la calibration peut commencer.

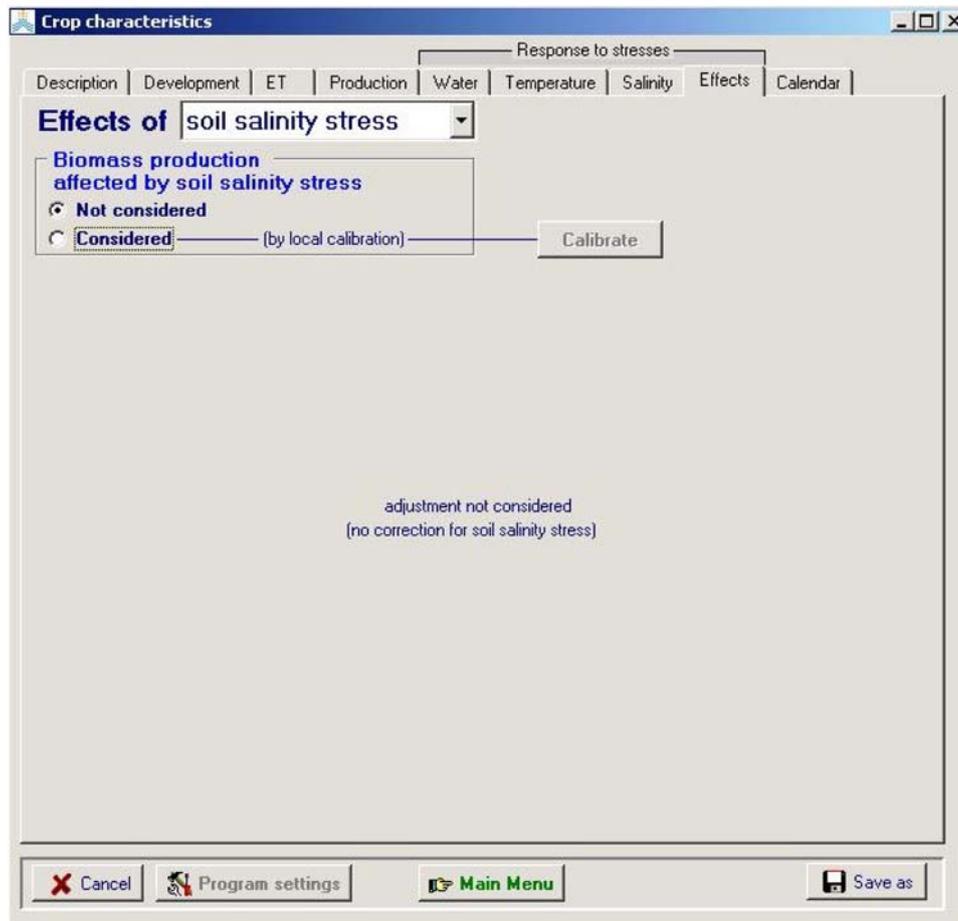


Figure 2.9j2 - Présentation du menu *Caractéristiques culturales (crop characteristics)* pour une culture pour laquelle l'effet du stress de salinité du sol sur la biomasse n'est pas considéré

Dans l'onglet '*Observations de terrain (field observations)*' du menu **Calibration du stress de salinité (calibration soil salinity stress)** (Fig. 2.9j3), l'utilisateur spécifie (par référence à la Fig. 2.9j1) les observations faites dans la parcelle en état de stress:

1. la production relative de biomasse observée, en sélectionnant une classe (variant de 'presque optimal' à 'très pauvre'), ou en spécifiant la production relative de Biomasse observée ($100 \frac{B_{\text{stress}}}{B_{\text{ref}}}$);
2. la couverture maximale de la canopée observée (CC_x), en sélectionnant une classe (de 'près de la référence' à 'très fortement réduite'), ou en spécifiant la CC_x ($CC_{x,\text{stress}}$) observée;
3. le déclin de la canopée observé au cours de la saison une fois que CC_x est atteinte, en sélectionnant une classe (variant de 'petit' à 'fort').

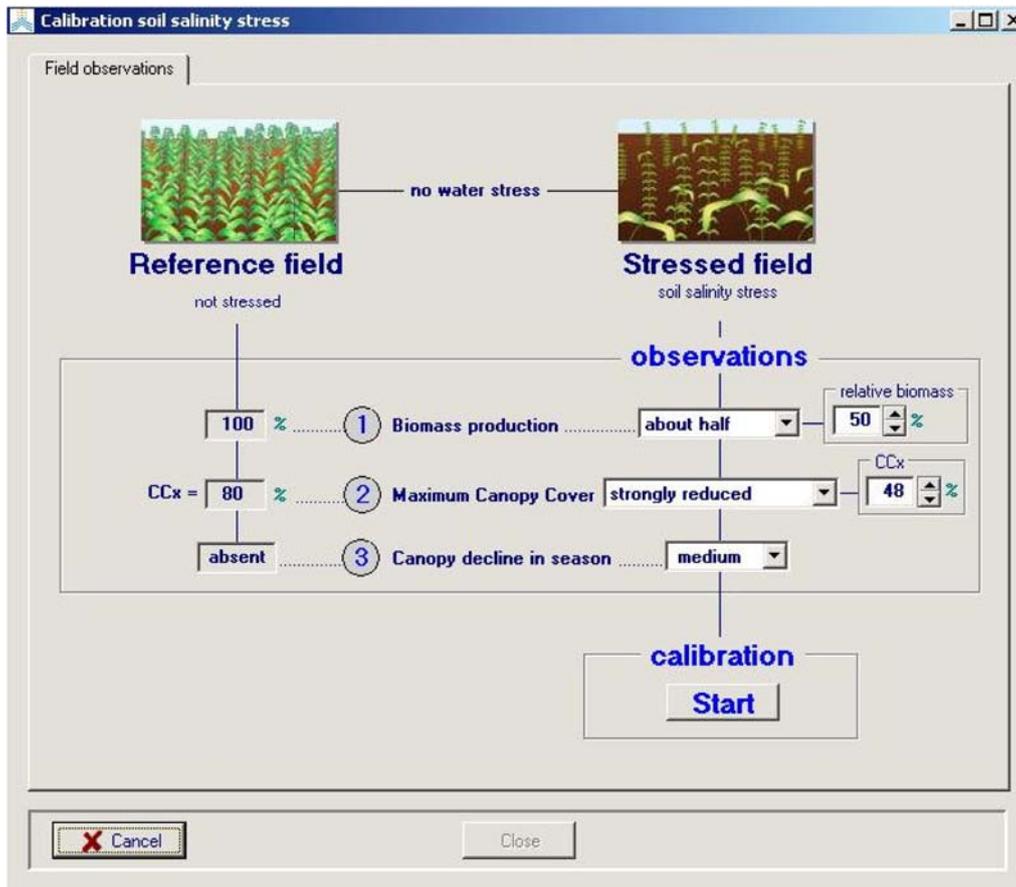


Figure 2.9j3 - Spécification des observations de terrain de la ‘parcelle en état de stress’ (*stressed field*) dans le menu *Calibration du stress de salinité du sol (calibration soil salinity stress)*

En cliquant sur le bouton <**Démarrer**> (*start*) de l’onglet ‘*Observations de terrain (field observations)*’ du menu *Calibration du stress de salinité du sol (calibration soil salinity stress)* (Fig. 2.9j3), AquaCrop sélectionne des valeurs pour les coefficients de stress ($K_{S_{exp,f}}$, K_{SCC_x} , $K_{S_{sto,salt}}$, $f_{CDecline}$), et change ainsi la canopée verte (CC) et la transpiration (Tr) simulées pour la parcelle en état de stress.

En essayant différentes valeurs pour les différents coefficients de stress, et en respectant les observations spécifiées (Fig. 2.9j3), AquaCrop fait des calculs pour chaque série de coefficients de stress, le CC_{stress} correspondant, la transpiration de la culture (Tr) et la production de Biomasse (B_{stress}), jusqu’à ce que la production relative de Biomasse simulée soit égale à la production relative observée dans la parcelle en état de stress.

Les résultats sont présentés dans l’onglet ‘*Réponse de la culture au stress de salinité du sol (crop response to soil salinity stress)*’ (Fig. 2.9j4). L’effet de stress de la fertilité du sol et de salinité du sol sur le développement de la canopée (CC_x , CGC , et la baisse de la canopée) est supposé être identique. Mais le stress de fertilité du sol est différent du stress de salinité du sol par ce que le stress de fertilité du sol résulte en une productivité réduite d’eau de la biomasse (Fig. 2.9h4) tandis que le stress de salinité provoque la fermeture des stomates (Fig. 2.9j4).

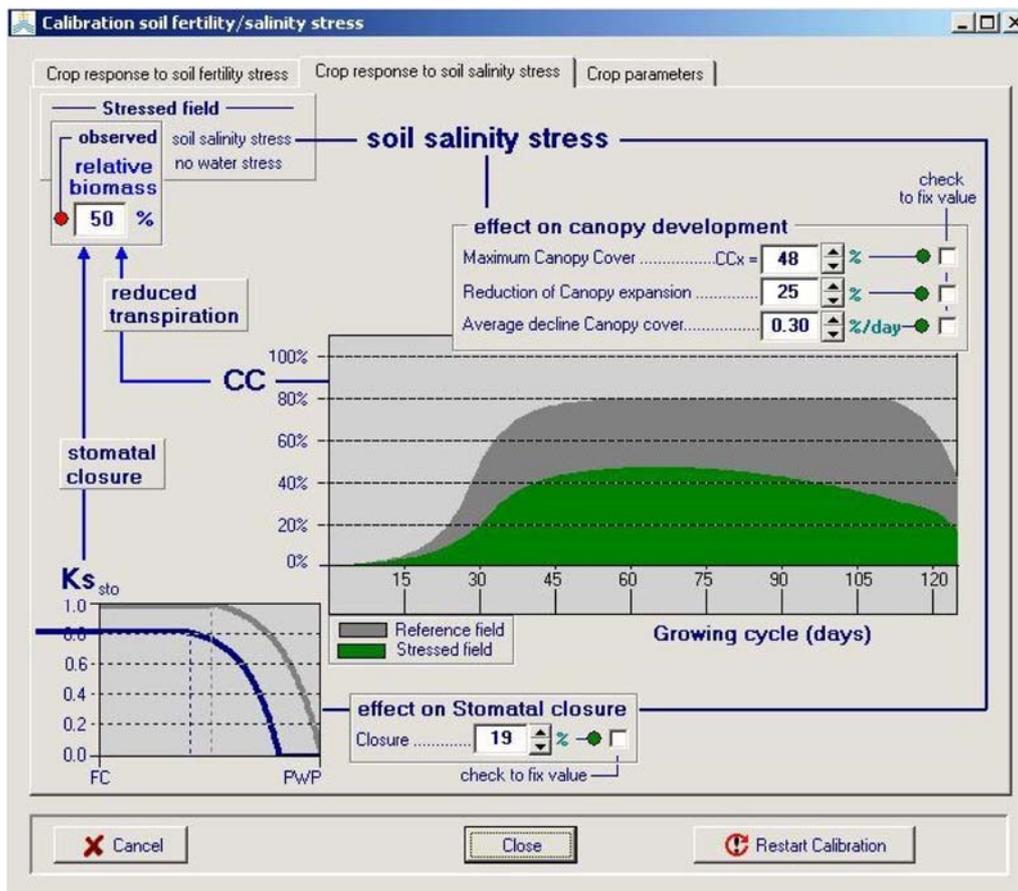


Figure 2.9j4 - La biomasse relative simulée (similaire à ce qui a été observée sur la parcelle en état de stress) obtenue en considérant l'effet de stress de salinité du sol sur (i) le développement de la canopée (*effect on canopy development*) (CCx, CGC et le déclin de la canopée), et (ii) la fermeture des stomates (*effect on stomatal closure*) ($K_{s_{sto}}$), comme présentée dans l'onglet 'Réponse de la culture au stress de salinité du sol' (*crop response to soil salinity stress*) du menu *Calibration de stress de salinité du sol (calibration soil salinity stress)*

Dans l'onglet '*paramètres de culture*' (*crop parameters*) du menu **Calibration du stress de salinité du sol** (*calibration soil salinity stress*), les réductions du développement de la canopée et de la transpiration de la culture sont présentées. La production relative de biomasse simulée correspondante, les 4 courbes K_s et les paramètres de culture (ajustés sur le stress), peuvent être consultés dans leurs onglets respectifs.

La calibration détermine la forme des 3 courbes K_s et du coefficient de déclin (f). La forme est donnée par les valeurs de K_s ou f , pour 3 différents niveaux de stress:

1. Pour la salinité du sol n'affectant pas la production de biomasse, le stress est de 0 % et les 3 coefficients (K_s) de stress de salinité du sol équivalents à 1, et le coefficient de déclin ($f_{CD_{Decline}}$) est zéro;
2. Lorsque le stress de salinité du sol est complet (100% stress), la production de la culture n'est plus possible et les coefficients K_s sont nuls et le coefficient de déclin ($f_{CD_{Decline}}$) est à son taux maximal, c'est à dire 1 % par jour;
3. Le stress dans la parcelle en état de stress est défini comme:

$$stress = 100 (100 - B_{rel}) \quad (Eq. 2.9)$$

où B_{rel} est le ratio entre la biomasse observée sur la parcelle en état de stress et sur la parcelle de référence ($B_{rel} = B_{stress}/B_{ref}$). En considérant l'effet sur son paramètre cible (CCx, CGC, Tr, et le déclin de canopée), les valeurs correspondantes pour Ks et f sont obtenues pour le niveau de stress défini.

Une fois la courbe calibrée, le Ks correspondant aux autres niveaux de stress de salinité du sol peut être obtenu de la courbe/

Mise au point

L'utilisateur peut procéder à une mise au point de la calibration en changeant dans le menu ***Calibration du stress de salinité du sol*** (*calibration soil salinity stress*) (Fig. 2.9j4): (i) la couverture maximale de la canopée (CCx), (ii) la réduction de l'expansion de la canopée, (iii) la diminution moyenne de la couverture de la canopée, ou (iv) l'effet sur la fermeture des stomates. Changer l'une des réductions ci-dessus changera les réductions des autres paramètres puisque AquaCrop recherchera toujours l'équilibre entre la production relative de biomasse simulée et celle observée dans la parcelle en état de stress. En cliquant sur l'une ou plusieurs des 4 cases de contrôle, l'utilisateur peut fixer la valeur d'une ou de plusieurs paramètres (Fig. 2.9j4).

En cliquant sur le bouton **<Redémarrer la calibration>** (*restart calibration*), l'utilisateur retourne à l'onglet '*Observations de terrain*' (*field observation*) (Fig. 2.9j3).

- L'effet du stress sur la biomasse est considéré

Relation entre biomasse et stress de salinité du sol

Pour la culture où l'effet de stress de salinité du sol est considéré, AquaCrop présente dans le menu *Caractéristiques culturales* (*crop characteristics*) l'effet sur le développement de la canopée, la transpiration de la culture, et la production de biomasse pour plusieurs niveaux de stress (de doux jusqu'au stress sévère). Dans le menu, la relation entre Biomasse et stress de salinité du sol est aussi présentée (Fig. 2.9j5). Les relations sont obtenues en (i) considérant pour différents niveaux de stress, l'effet sur CCx, CGC, la baisse de la canopée et la transpiration de la culture (Tr), et (ii) en calculant le développement de la canopée, la transpiration de la culture, et la réduction de la production relative de biomasse, en supposant qu'il n'y a pas de stress hydrique. L'effet des différents niveaux de stress considérés sur CCx, CGC, la baisse de la canopée, et Tr est décrit par les Ks et les courbes de réductions individuellement calibrées. Puisque les formes de la courbe Ks ne sont pas identiques, la relation B-stress n'est pas linéaire et diffère également entre le stress de fertilité et de salinité du sol (Fig. 2.9j5).

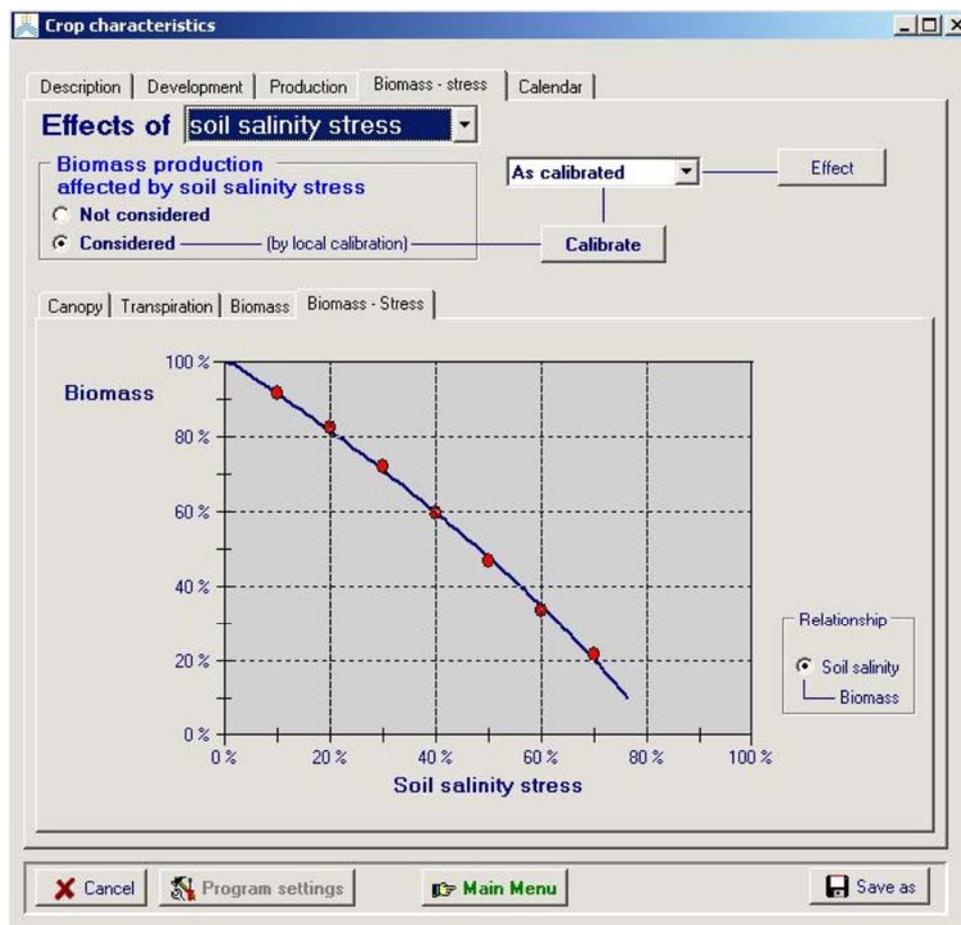


Figure 2.9j5 - Relation entre Biomasse et stress de salinité du sol dans l'onglet 'Biomasse-Stress' du menu *Caractéristiques culturales* (*crop characteristics*)

Mise au point

Pour les cultures où l'effet de stress de salinité du sol sur la biomasse est considéré, la calibration peut être mise au point en cliquant sur le bouton **<Calibrer>** (*calibrate*) du menu **Caractéristiques culturelles** (*crop characteristics*), qui présentera le menu **Calibration du stress de salinité du sol** (*calibration soil salinity stress*) (Fig. 2.9j4).

En cliquant sur le bouton **<Redémarrer la calibration>** (*restart calibration*) du panel de contrôle du menu **Calibration du stress de salinité du sol** (*calibration soil salinity stress*), l'utilisateur retourne à l'onglet 'Observations de terrain' (*field observation*) (Fig. 2.9j3).

2.9.11 Calendrier

Un aperçu du calendrier de la période de croissance est présenté dans l'onglet *Calendrier* (*calendar*) du menu *Caractéristiques culturales* (*crop characteristics*) (Fig. 2.9k).

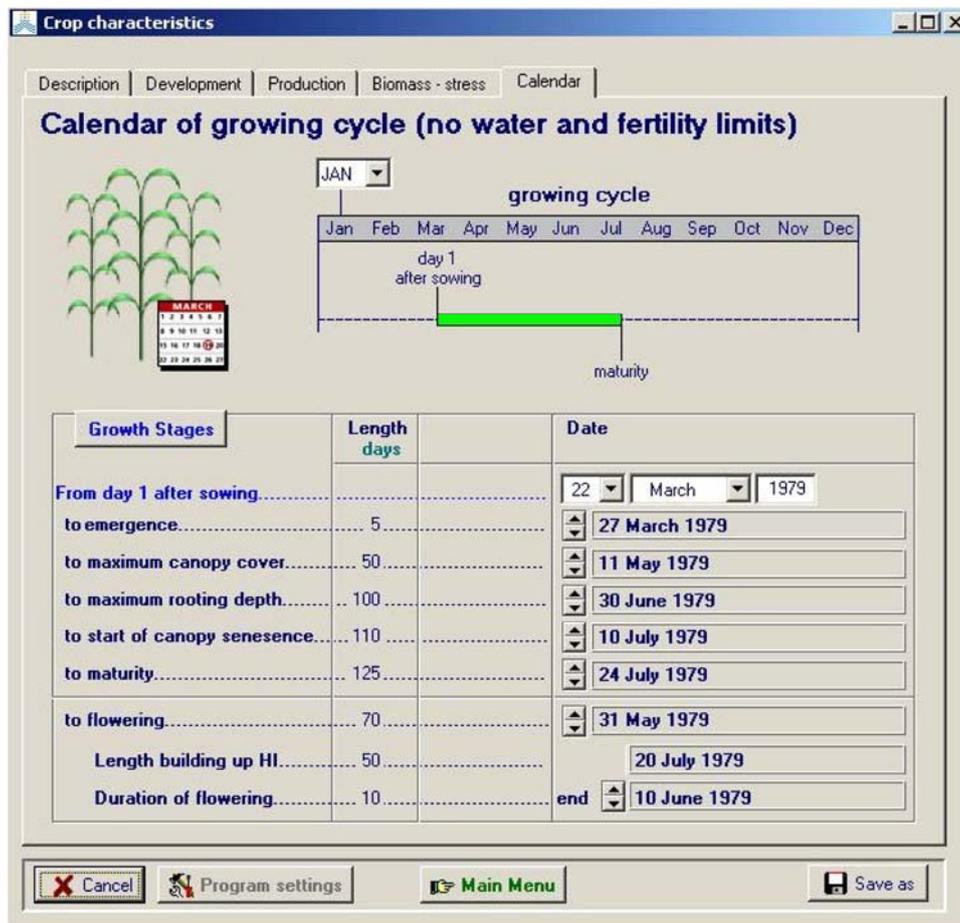


Figure 2.9k - Calendrier de culture avec indication des stades de croissance selon FAO 56

Dans le calendrier, la durée des étapes de croissance peut aussi être présentée. Les étapes font référence aux définitions utilisées dans les récentes publications de la FAO (Irrigation and Drainage Papers 24, 33 et 56) et sont:

- La **phase initiale** débute à la semence et s'arrête lorsque la couverture de la canopée est à 10% ($CC = 0.10$) ;
- La **phase de développement de canopée** débute quand la couverture de la canopée dépasse 10 % et s'arrête lorsque 98% de la couverture maximale de canopée est atteinte ($CC = 0.98 CC_x$) ;
- La **phase de mi-saison** débute lorsque la couverture atteint $0.98 CC_x$ et s'arrête lorsque la sénescence commence. La fin de l'étape est déterminée par le temps d'atteindre la sénescence de la canopée.
- La **phase de fin saison** débute lorsque les jours de sénescence sont atteints et s'arrête au moment où la maturité de la culture est atteinte et la culture est prête pour être récoltée.

Dans l'Annexe II (Tab. II-1), des valeurs indicatives pour des durées de phases de développement de la culture pour diverses périodes de plantation et diverses régions climatiques, pour des cultures d'une agriculture commune sont présentées.

2.9.12 Paramètres de configuration du programme

Du menu *Caractéristiques culturales* (*crop characteristics*) l'utilisateur a accès aux paramètres de configuration du programme inscrits dans le Tableau 2.91. L'effet des paramètres sur l'évaporation du sol, la transpiration de la culture, l'expansion et la baisse de la canopée, et le stress hydrique du sol sont expliqués dans les sections appropriées du Chapitre 3 (Procédures de calcul).

Tableau 2.91 - Paramètres de programme affectant l'évaporation du sol, la transpiration d'une culture, le développement de la culture, la production et l'effet des stress de salinité et hydrique

Symbole	Paramètre de programme	Défaut
fk K _{ex}	<i>Evaporation de sol</i> - Facteur de baisse d'évaporation pour l'étape II - Coefficient d'évaporation du sol pour une surface du sol entièrement humide et non ombreuse.	4 1.10
-	<i>Indice de Récolte</i> - Seuil pour la couverture de la canopée verte ; en-dessous duquel (couverture de 5%) HI ne peut plus accroître due à une photosynthèse inadéquate (% de couverture)	5 %
-	<i>Germination</i> - La teneur en eau minimale du sol exigée pour la germination du semis en profondeur (%TAW)	20 %
Z _o	<i>Zone Racinaire</i> - La profondeur initiale de l'expansion de la courbe de la zone racinaire (% profondeur racinaire effective minimale) - Facteur de forme pour la courbe décrivant l'effet du stress hydrique (transpiration relative) pour l'expansion de la zone racinaire	70 % -6
- β	<i>Sénescence</i> - Facteur de forme (exposant a) pour le coefficient d'ajustement de K _{cbx} , considérant la baisse dans l'activité photosynthétique de la culture en fin de cycle. - Diminution de p(sen) dès que la sénescence de canopée est déclenchée (% de p(sen))	1 12 %
- f _{adj} -	<i>Stress</i> - Stress d'aération: Nombre de jours dont la déficience d'aération est entièrement effective - Stress hydrique : facteur d'ajustement pour la correction d'ET _o lié à l'épuisement d'eau du sol (p) (fraction de l'ajustement par défaut de la FAO) - Stress de salinité du sol : Seuils du stress hydrique pour la fermeture des stomates.	3 jours 1.0 affecté par la salinité du sol

2.10 Démarrage du cycle de croissance

Le début du cycle de croissance est spécifié dans le *Menu principal* (Fig. 2.10a) par

- spécification de la date, ou
- génération d'un début basé sur la pluviométrie ou la température de l'air.

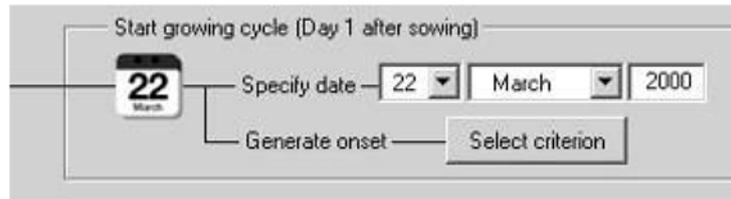


Figure 2.10a - Onglet dans le *Menu principal* (*main menu*) où le début du cycle de croissance (*start growing cycle*) est spécifié

2.10.1 Spécification de la date

L'utilisateur spécifie le premier jour observé ou planifié du début du cycle de croissance (i.e. le premier jour après le semis ou la plantation). Si les données climatiques sélectionnées sont liées à une année spécifique, le début de la période de croissance est aussi lié à cette même année. Si les données climatiques se composent de plusieurs années, le début de la période de croissance se produit dans la première année de la série des données climatiques. L'année peut être ajustée dans le panel.

2.10.2 Début généré

- **Début généré sur base de la pluviométrie**

Dans les cultures pluviales, le semis ou la plantation est typiquement déterminé par des événements de pluviométrie. En cliquant sur <**Sélection de critère**> (*select criterion*) commandé du *Menu principal* (*main menu*), le **Début généré sur base de la pluviométrie** (*onset based on rainfall*) est présenté (Fig. 2.10b). En choisissant l'un ou l'autre critère, le début du cycle de croissance est déterminé en appréciant les données de pluviométrie indiquées dans le fichier données pluviométriques choisi. En spécifiant le premier et dernier jour dans une 'Fenêtre de recherche', seulement les données pluviométriques spécifiées dans cette fenêtre sont évaluées. Les critères suivants peuvent être sélectionnés pour déterminer le début du cycle de croissance:

- la **pluviométrie cumulée** (*cumulative rainfall*) depuis le début de la période de recherche, est supérieure ou égale à une valeur définie d'avance;
- la **pluviométrie observée pendant un certain nombre de jours successifs** (*rainfall during a number of successive days*) est supérieure ou égale à une valeur définie;
- la **pluviométrie décadaire** (*10-daily rainfall*) est égale ou excède la valeur définie d'avance;
- la **pluviométrie décadaire excède la fraction d'ET_o décadaire** (*10-day rainfall exceeds fraction of the 10-day ET_o*) définie d'avance.

Les deux dernières options sont particulièrement utiles si seulement une pluviométrie décadaire ou mensuelle est disponible.

La première occurrence d'une date de démarrage est la première date pour laquelle le critère sélectionné tient. Les 10 prochaines occurrences des jours de démarrages sont présentées

lorsque l'utilisateur clique sur la commande **<Prochains jours>** (*next days*). Lorsque le début de la saison pluvieuse est incertain à la première occurrence du critère sélectionné, sélectionner une des prochaines occurrences présentées, ou spécifier un critère plus strict qui permettrait d'éviter une sénescence précoce de canopée et un échec complet de la culture après germination.

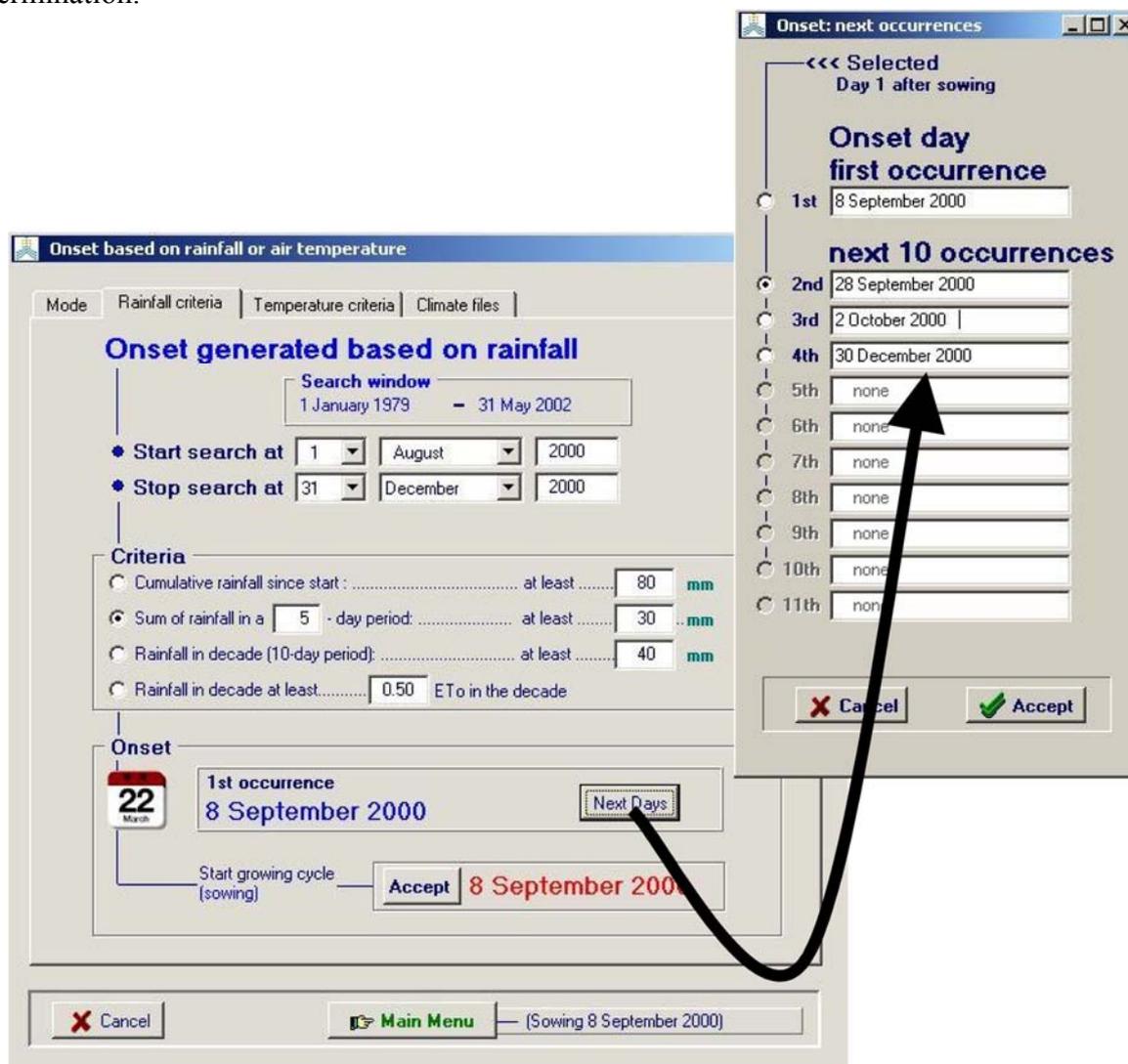


Figure 2.10b - Menu *Début généré basé sur la pluviométrie (onset based on rainfall)* où le début généré pour la période de croissance est déterminé par un excédent de 25 mm de pluviométrie au cours d'une période successive de 5 jours, à compter du 1^{er} Août 2000 (démarrage de la fenêtre de recherche)

- **Début généré sur base des températures de l'air**

Des changements climatiques augmenteront probablement les températures de l'air dans de multiples régions. Afin de pouvoir estimer la date de semence dans l'avenir pour des cultures de printemps dans des climats froids, AquaCrop offre la possibilité de générer une date de semis/plantation basée sur la température de l'air. En sélectionnant un ou autre critère, une date de semis/plantation probable est générée en évaluant les données de température de l'air spécifié dans le fichier Température de l'air (*air temperature*). En spécifiant la première et dernière date dans la 'Fenêtre de recherche' (*search window*), uniquement des données de température dans cette période seront évaluées (Fig. 2.10c).

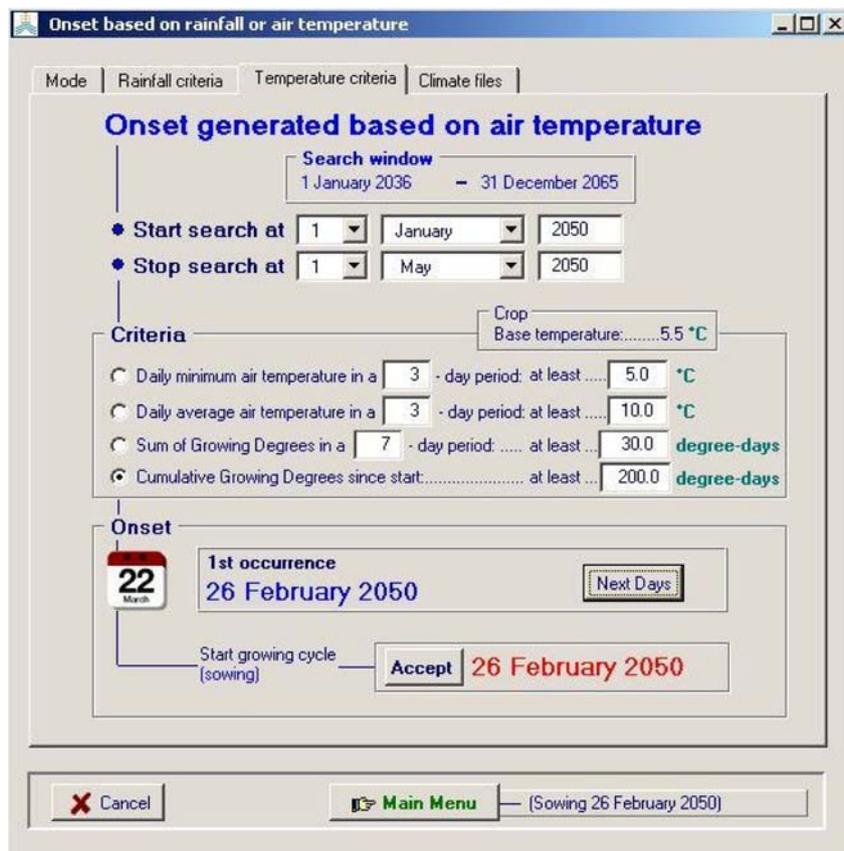


Figure 2.10c - Sélection d'un critère de température dans le menu *Début généré sur base de pluviométrie ou température de l'air* (onset based on rainfall or air temperature)

Les critères suivants peuvent être choisis afin de déterminer le début du cycle de croissance basé sur la température de l'air :

- La température minimale journalière, de chaque jour d'un certain nombre de jours successifs, est égale ou est supérieure à une température de l'air minimale spécifiée ;
- La température moyenne journalière, de chaque jour d'un certain nombre de jours successifs, est égale ou est supérieure à une température de l'air moyenne spécifiée ;
- La somme des degrés de croissance pour un certain nombre de jours successifs est égale ou est supérieure aux nombres de degrés jours de croissance spécifiés ;
- Le cumul des degrés de croissance depuis le début d'une période de recherche est égal ou excède les degrés jours de croissance spécifiés.

La première occurrence d'une date de début est la première date pour laquelle le critère sélectionné est valable. Les 10 occurrences suivantes de dates de début peuvent être visualisées en cliquant la commande <Prochains jours> (next days).

2.11 Gestion d'irrigation

La gestion d'irrigation sélectionnée peut être affichée dans le menu *Affichage de gestion de l'irrigation* (*display of irrigation management*) et mise à jour dans le menu *Gestion d'irrigation* (*irrigation management*) (Fig. 2.11a). On peut considérer divers modes d'irrigation dans AquaCrop. L'utilisateur peut opter pour (i) culture hivernale sans irrigation (aucune irrigation dans la saison) (*rained cropping*), (ii) la détermination du besoin net en eau d'irrigation (*determination of net irrigation requirement*), (iii) un calendrier d'irrigation en spécifiant les événements (*irrigation schedule*) ou (iv) l'élaboration d'un calendrier d'irrigation en spécifiant le moment et la quantité appliquée (*generation of irrigation schedule*).



Figure 2.11a - Sélection du mode dans le menu *Gestion d'irrigation* (*irrigation management*)

2.11.1 Pas d'irrigation (culture hivernale)

En choisissant cette option (*no irrigation ; rained cropping*), aucune irrigation ne sera générée en exécutant une simulation.

2.11.2 Détermination du besoin net en eau d'irrigation

En choisissant cette option (*determination of net irrigation water requirement*), AquaCrop calculera pendant la simulation la quantité d'eau exigée pour éviter le stress hydrique de la culture. Lorsque l'épuisement de la zone racinaire excède un certain seuil (50 % de RAW est la valeur par défaut), une petite quantité d'eau d'irrigation sera stockée dans le profil de sol pour

garder l'épuisement de la zone racinaire juste au-dessus du seuil spécifié. Le seuil pour l'épuisement de la zone racinaire peut être ajusté.

La quantité totale d'eau d'irrigation exigée pour garder le contenu en eau dans le profil de sol au-dessus du seuil, est le besoin net en eau d'irrigation. Le besoin net ne considère pas l'eau supplémentaire qui doit être appliquée pour représenter des pertes de transport ou de la distribution inégale d'eau d'irrigation sur la parcelle.

2.11.3 Calendrier d'irrigation (événements spécifiés)

L'utilisateur spécifie la date, la quantité appliquée et la qualité de l'eau pour chaque irrigation (*irrigation schedule ; specified events*) (Fig. 2.11b). La profondeur de l'irrigation se réfère à la quantité d'irrigation nette. L'eau supplémentaire appliquée au terrain pour tenir compte des pertes de transport ou la distribution inégale de l'eau de l'irrigation sur le terrain ne devrait pas être ajoutée.

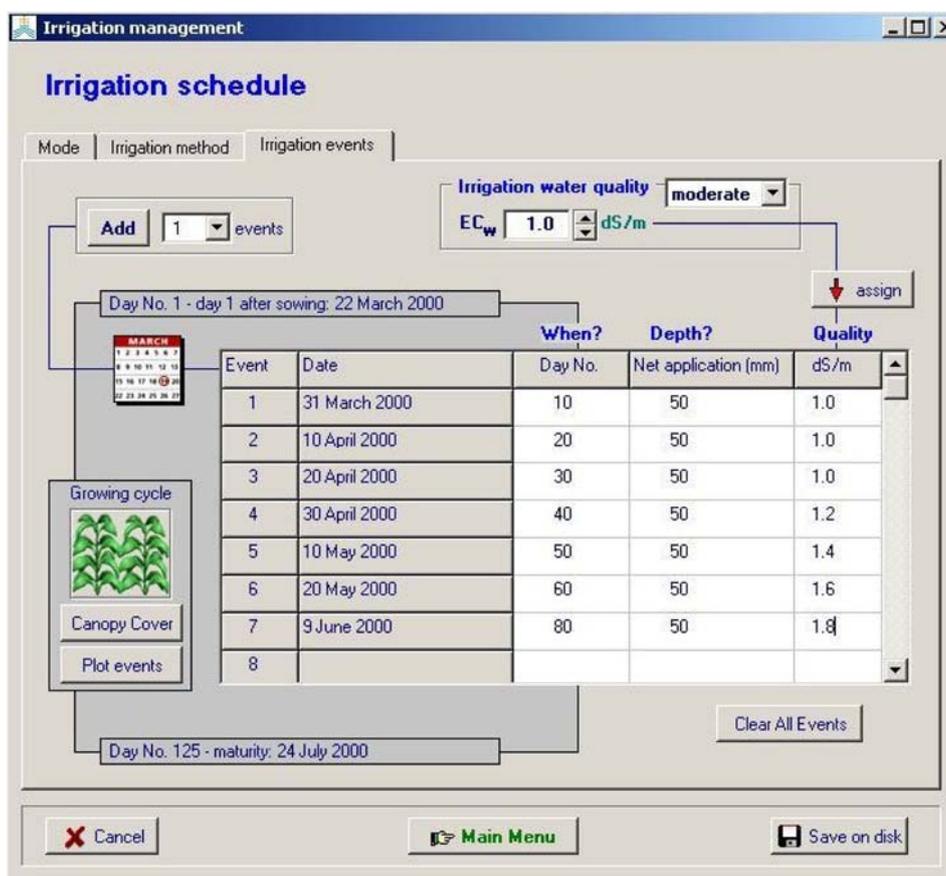


Figure 2.11b – Moment (*when*), quantité appliquée (*depth*) et qualité (*quality*) de l'eau des irrigations

2.11.4 Génération des calendriers d'irrigation

Au moment de la simulation, les irrigations peuvent être générées en spécifiant les moments et les quantités appliquées (*generation of irrigation schedule*). Le moment spécifie 'Quand' est-ce qu'une irrigation doit être appliquée tandis que la quantité appliquée détermine 'Combien' d'eau doit être appliquée. Après la sélection des critères, les moments, les quantités appliquées,

et les qualité de l'eau doivent être spécifiées (Fig. 2.11c). Les valeurs spécifiées pour un jour spécifique d'une période culturale, seront valables jusqu'à la date où une autre valeur est spécifiée, ou jusqu'à la fin du cycle de culture, quand aucune valeur n'est spécifiée pour les dates postérieures. Ainsi on peut ajuster les valeurs au développement de la culture ou à la période de la saison. Dans la Figure 2.11d la génération des calendriers d'irrigation comme défini dans la Figure 2.11c est présentée.

Les moments et les quantités appliquées ainsi que leurs paramètres correspondants qui doivent être spécifiés sont listés dans des Tableaux 2.11a et 2.11b.

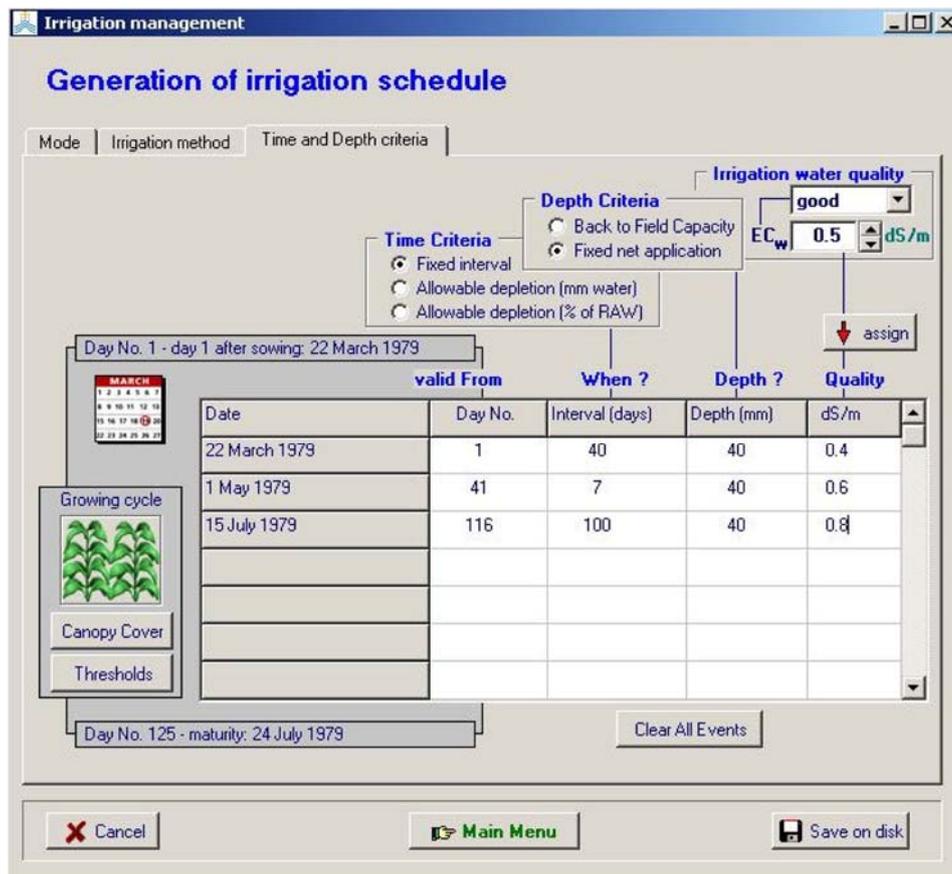


Figure 2.11c - Calendrier d'irrigation où l'intervalle d'irrigation varie tout au long du cycle, tandis que la quantité appliquée demeure constante, et la qualité de l'eau d'irrigation se détériore

pas d'irrigation		intervalle d'irrigation : 7 jours		pas d'irrigation	
		quantité appliquée : 40 mm			
Jour 1	Jour 41			Jour 116	Jour 125
22 Mars	1 Mai			15 Juillet	24 Juillet
semis					maturité

Figure 2.11d - Calendrier d'irrigation généré comme spécifié dans la Figure 2.11c

Tableau 2.11a - Critère de temps (intervalle) et paramètre correspondant

Critère	Paramètre
Intervalle fixe (jours) (<i>fixed interval</i>)	Intervalle entre irrigations (par exemple 10 jours)
Épuisement autorisé (<i>allowable depletion</i>) (mm d'eau)	Quantité d'eau qui peut être épuisée dans la zone racinaire (la référence est la teneur en eau du sol à la capacité au champ) avant qu'une irrigation devrait être appliquée (par exemple 30 mm)
Épuisement autorisé (<i>allowable depletion</i>) (% de RAW)	Pourcentage de RAW qui peut être épuisée avant qu'une irrigation devrait être appliquée (par exemple 100%)

Tableau 2.11b – Quantité appliquée et paramètres correspondants

Critère	Paramètres
Retour à la Capacité au champ (<i>back to field capacity</i>) (+/- mm d'eau)	L'eau supplémentaire en plus de la quantité d'eau d'irrigation nécessaire pour ramener la zone racinaire à la capacité au champ. La valeur spécifiée peut être zéro, positive ou négative : <ul style="list-style-type: none"> - zéro: l'irrigation appliquée apportera la teneur en eau du sol dans la zone racinaire à la capacité au champ (atteinte à la fin du jour); - positive: une irrigation supplémentaire est prévue par exemple à des fins de lessiver le sol (par exemple + 20 mm); - négative: une sous irrigation est prévue par exemple pour bénéficier de pluies attendues (par exemple - 10 mm)
Quantité appliquée fixe (<i>fixed net application</i>) (mm d'eau)	Profondeur d'irrigation nette

2.11.5 Méthode d'irrigation

De nombreux types de systèmes d'irrigation mouillent seulement une fraction de la surface du sol. Quand seulement une partie de la surface du sol est mouillée, moins d'eau s'évapore de la surface du sol après une irrigation. En sélectionnant une méthode d'irrigation, une valeur indicative de la fraction de surface du sol mouillée est assignée (Tab. 2.11c). L'utilisateur peut modifier la valeur si une information plus spécifique est disponible à partir d'observations de terrain.

Tableau 2.11c - Valeurs indicatives pour la fraction de la surface du sol mouillé pour diverses méthodes d'irrigation

Méthodes d'Irrigation	Surface du sol mouillée(%)
irrigation par aspersion	100
irrigation de bassin	100
irrigation par planche	100
irrigation à la raie (chaque sillon), lit étroit	60 – 100
irrigation à la raie (chaque sillon), grand lit	40 – 60
irrigation à la raie (sillons alternés)	30 – 50
goutte à goutte - micro irrigation	15 – 40
goutte à goutte sous-sol	0

2.11.6 Qualité d'eau d'irrigation

Etant donné que la qualité de l'eau d'irrigation peut changer au cours de la saison, elle doit être précisée pour chaque événement d'irrigation (voir 2.11b et 2.11c). La qualité est exprimée par la conductivité électrique de l'eau d'irrigation (EC_w) en deciSiemens par mètre (dS/m). Lorsque la qualité de l'eau d'irrigation reste constante au cours du cycle cultural, une EC_w constante peut être attribuée à tous les événements d'irrigation. Des valeurs indicatives d' EC_w pour différentes classes d'eau d'irrigation sont répertoriées dans le tableau 2.11d.

Tableau 2.11d - Valeurs indicatives pour des classes de qualité de l'eau d'irrigation (EC_w)

Plage d' EC_w Conductivité électrique (dS/m)	Classe Qualité d'eau d'irrigation
0.0 - 0.2	excellente
0.3 - 1.0	bonne
1.0 - 2.0	modérée
2.1 - 3.0	mauvaise
>3.0	très mauvaise

2.12 Gestion de parcelle

La gestion de la parcelle sélectionnée peut être affichée dans le menu *Affichage de gestion de parcelle* (display of field management), et la mise à jour dans le menu *Gestion de parcelle* (field management) (Fig. 2.12a). Des options de niveau de fertilité du sol et des pratiques qui affectent le bilan d'eau du sol sont spécifiées dans ce menu.

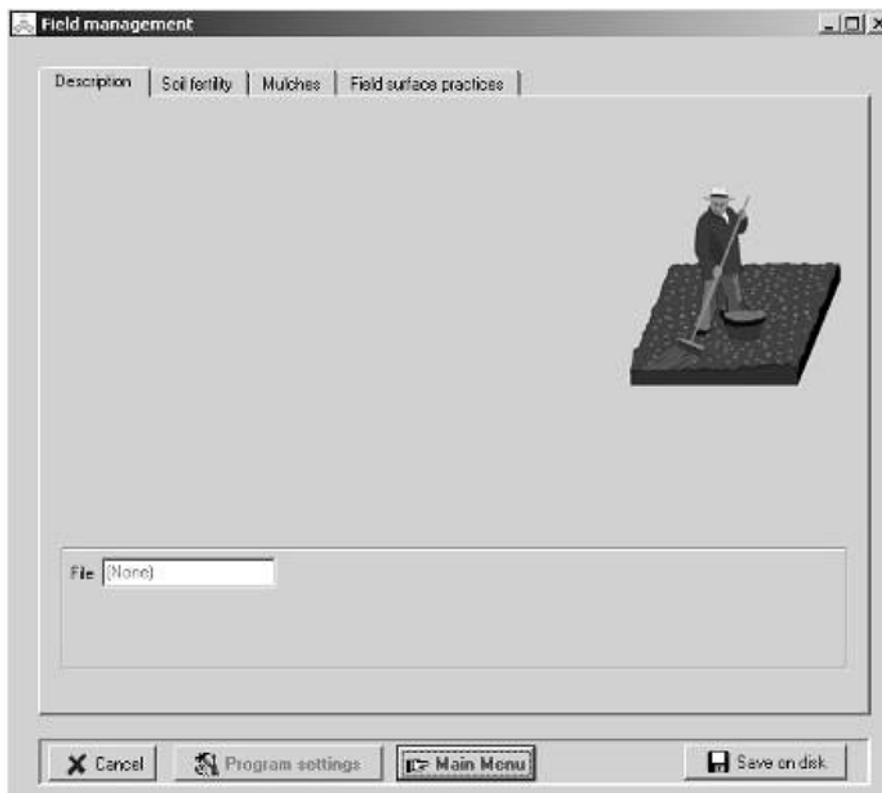


Figure 2.12a - Menu *Gestion de parcelle* (field management)

2.12.1 Fertilité du sol

Quand la fertilité du sol est limitée, la production de biomasse diminue à la suite de l'effet de fertilité du sol sur (i) le développement de la canopée (CC) et ainsi sur la transpiration des cultures et sur (ii) la productivité de l'eau de la biomasse (WP*). La production maximale de la biomasse qui peut être atteinte en stress de fertilité des sols est spécifiée en:

- sélectionnant l'une des classes allant de non limitée à très faible (Tab. 2.12a), ou
- spécifiant directement la production de biomasse dans le menu **Gestion de parcelle** (*field management*).

La production de biomasse sélectionnée est la production que l'on peut attendre pour les conditions climatiques spécifiées en absence de tout autre stress. La réponse de la culture à la fertilité du sol sera différente si d'autres stress se produisent au cours du cycle.

Pour une production maximale de biomasse sélectionnée, AquaCrop affiche (i) le développement de la canopée, (ii) la productivité de l'eau correspondant à la quantité de biomasse produite, (iii) la production maximale de biomasse prévue, (iv) la relation calibrée de biomasse - stress, et (v) les valeurs ajustées pour des paramètres particuliers de culture (Fig. 2.12b).

La relation biomasse-stress (Fig. 2.12c), calibrée dans le menu **Caractéristiques culturales** (*crop characteristics*), détermine le stress de fertilité du sol correspondant et par conséquent, les valeurs des coefficients de stress ($K_{Sexp,f}$, K_{SWP} , K_{SCCx} , $f_{CDDecline}$).

Tableau 2.12a - Classes, les valeurs par défaut correspondantes, et les plages de la fertilité des sols

Classe	Valeur par défaut	Plage
non limitée	100 %	99 – 100 %
presque optimale	80 %	76 – 98 %
modérée	60 %	56 – 75 %
environ la moitié	50 %	45 – 55 %
pauvre	40 %	35 – 44 %
très pauvre	25 %	34 – 20 %

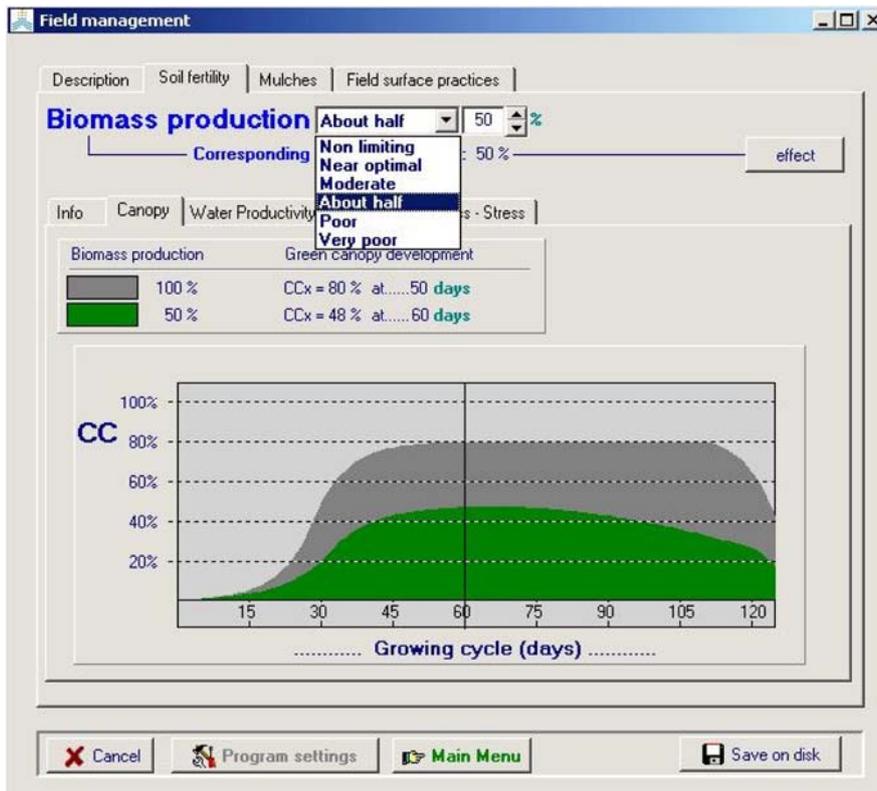


Figure 2.12b - Réponse de la culture pour la production de biomasse sélectionnée dans le menu *Gestion de parcelle (field management)*

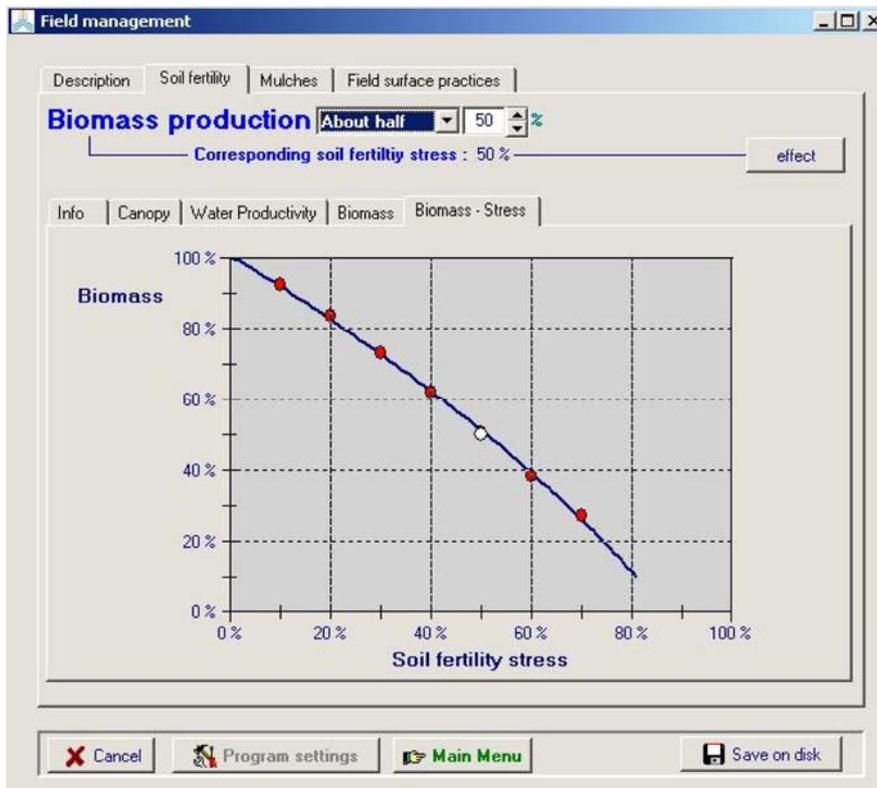


Figure 2.12c - Relation calibrée de Biomasse-stress dans le menu *Gestion de terrain (field management)*

2.12.2 Paillis

Des paillis couvrant la surface du sol affecteront l'évaporation du sol. Selon le type de paillis et la fraction de la surface du sol couverte, la réduction de l'évaporation du sol peut être substantielle. L'utilisateur spécifie:

- le degré de couverture du sol;
- le type de paillis :
 - paillis de plastique synthétique qui réduisent complètement l'évaporation de l'eau de la surface du sol (100 %)
 - paillis organiques qui se composent de résidus de végétaux non incorporés, ou d'un matériel étranger importé sur le terrain comme de la paille, et réduisent l'évaporation du sol de 50%,
 - l'utilisateur spécifie les paillis, pour lesquels la réduction de pertes par évaporation de l'eau du sol doit être spécifiée par l'utilisateur.

La réduction totale de l'évaporation du sol, et de l'évaporation relative du sol (ou le coefficient d'évaporation de l'eau du sol, et le coefficient de transpiration de la culture), est présentée dans la Figure 2.12d.

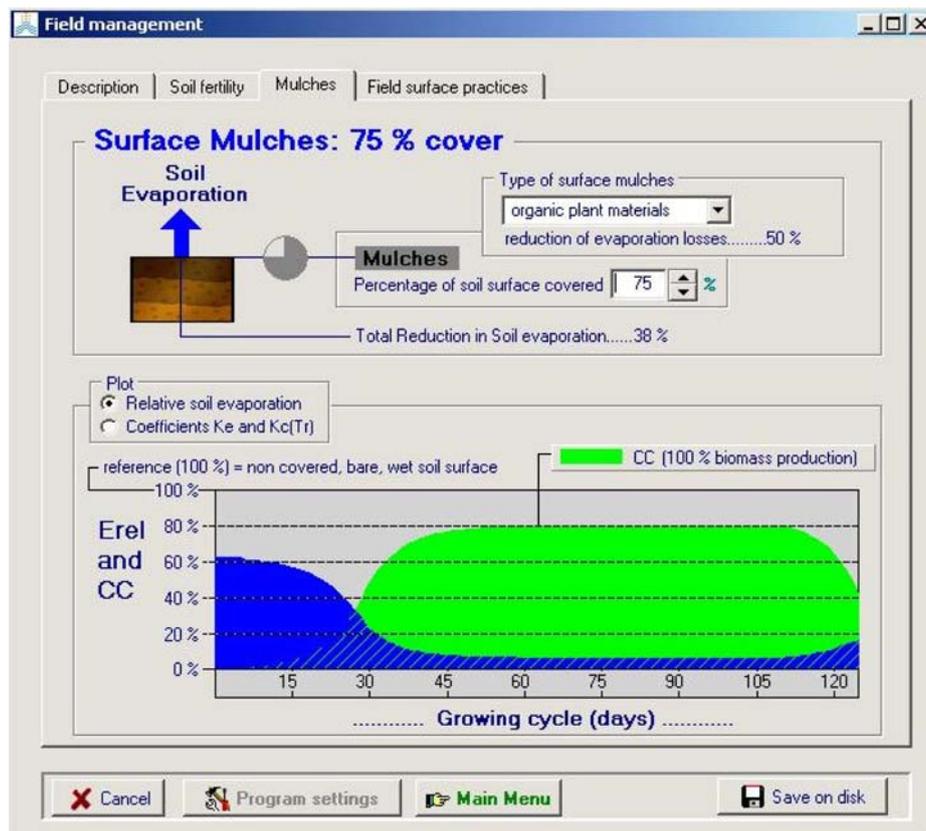


Figure 2.12d - Effet des paillis sur l'évaporation du sol

2.12.3 Pratiques en surface de parcelle

Des pratiques en surface de parcelle et des diguettes en terre pourraient empêcher qu'une partie des précipitations intenses ou d'irrigation excessive soit perdue par ruissellement :

- Quand des pratiques de labour, tel que le billonnage ou la construction des contours, éliminent les ruissellements d'eau de pluie, l'utilisateur peut désactiver la procédure de ruissellement. Cependant le ruissellement se fera toujours si la pluie ou des événements d'irrigation excèdent le taux d'infiltration de la couche supérieure de sol. Seulement, si l'excès de pluie ou d'eau d'irrigation peut être stocké sur le terrain entre des diguettes en terre, les ruissellements seront complètement inhibés.
- Les diguettes en terre sont construites pour stocker l'eau sur le terrain (comme c'est le cas dans les rizières). S'il existe des diguettes, l'utilisateur spécifie leur hauteur.

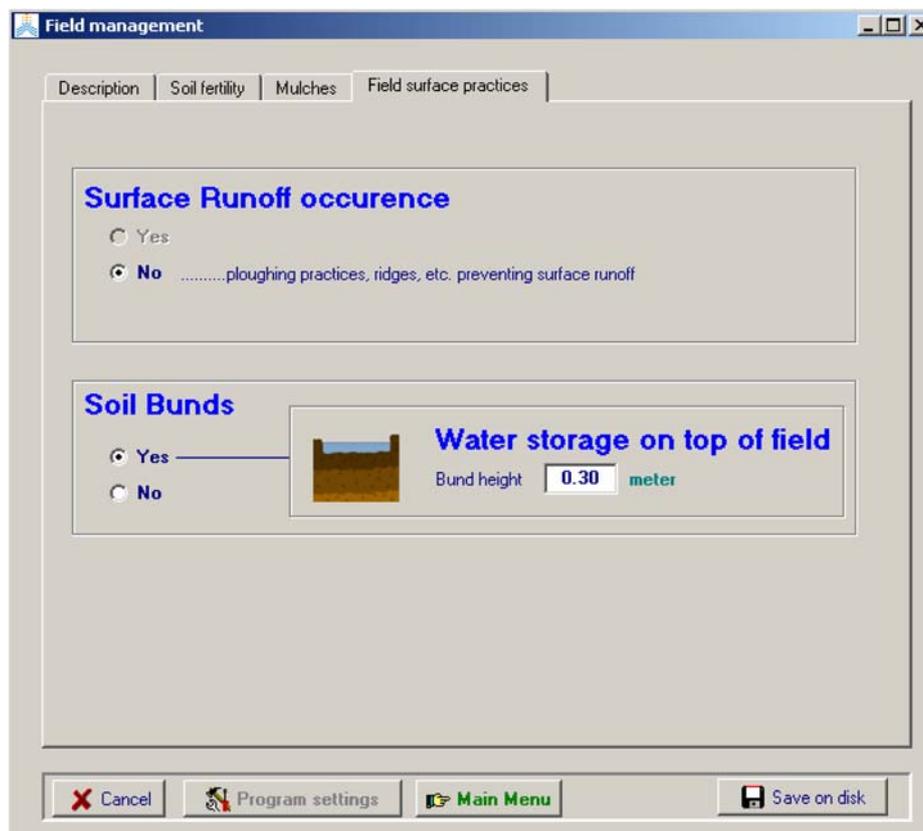


Figure 2.12e - Sélection des diguettes comme gestion de parcelle

2.12.4 Paramètres de configuration du programme

Dans le menu *Gestion de parcelle* (*field management*), l'utilisateur a accès aux configurations pour les des paramètres de terrain (Tab. 2.12b).

Tableau 2.12b - Paramètre du programme affectant l'évaporation du sol

Symbole	Paramètre du programme	Défaut
	- La profondeur de sol dont l'évaporation peut extraire de l'eau du sommet du profil de sol	30 cm

2.13 Caractéristiques du profil de sol

Les caractéristiques de divers horizons de sol et de la couche de surface du sol, la présence d'une couche de sol restrictive qui pourrait bloquer l'expansion de la zone racinaire, et la remontée capillaire maximale sont présentées dans le menu *Présentation des caractéristiques de profil de sol* (display of soil profile characteristics) et mise à jour dans le menu *Caractéristiques de profil de sol* (soil profile characteristics) (Fig. 2.13a).

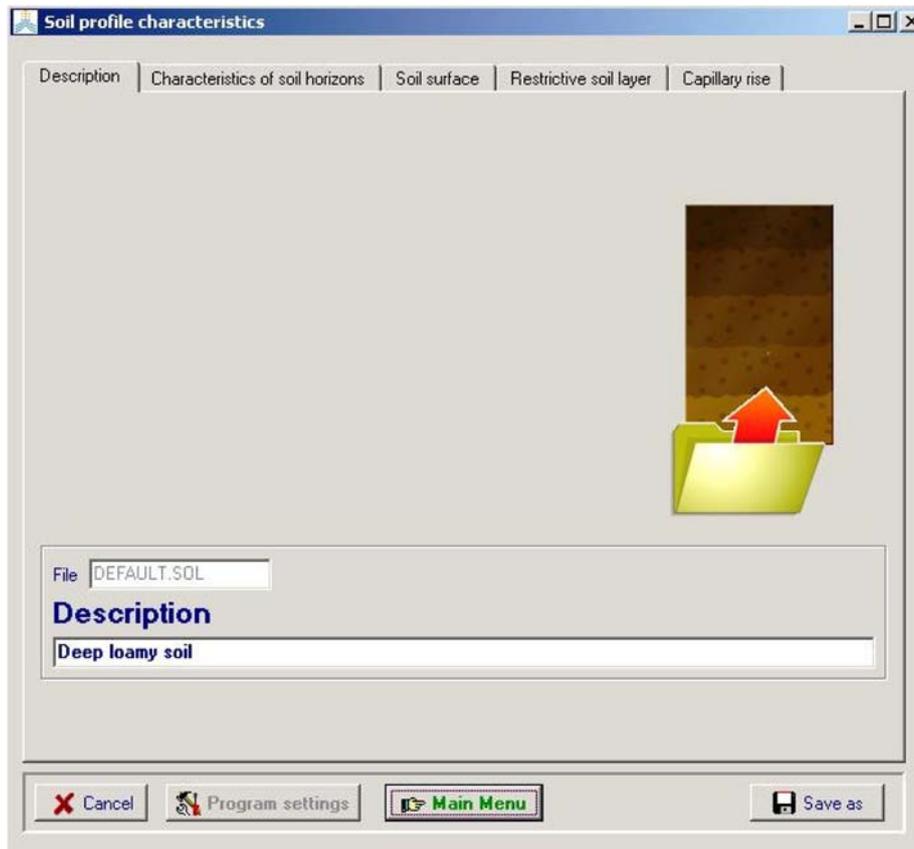


Figure 2.13a - Menu *Caractéristiques de profil de sol* (soil profile characteristics)

2.13.1 Horizons de sol et leurs caractéristiques physiques

Le profil de sol peut être composé de jusqu'à cinq horizons différents, chacun avec ses propres caractéristiques physiques. Les données de sol consistent en : différents horizons de sol, leur contenu volumétrique en eau à la saturation, la capacité au champ et le point de flétrissement permanent, et leur conductivité hydraulique à la saturation de sol.

- **La teneur en eau du sol à la saturation, à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent**
 - **Saturation** (*saturation*). Lorsque le volume total des pores est rempli d'eau, la teneur en eau du sol est à la saturation. De telles conditions sont plutôt rares dans la zone racinaire en raison de l'air piégé et le drainage vertical. Les conditions saturées n'existent généralement que lorsque la nappe phréatique se trouve au niveau de la zone racinaire ou à proximité.
 - **La capacité au champ** (*field capacity*) est la quantité d'eau qu'un sol bien drainé peut

contenir malgré les forces de gravitation. C'est la limite supérieure pour l'eau extractible par la plante. Bien que la matrice potentiel du sol à la capacité au champ varie quelque peu avec le type de sol et les conditions environnementales, la teneur en eau à une matrice potentiel de -10 kPa (pF 2.0) jusqu'à -33 kPa (pF 2.5 ou 1/3 barre), est souvent considéré comme la capacité au champ.

- **Le point de flétrissement permanent** (*permanent wilting point*) est le contenu en eau du sol, auquel les plantes arrêtent d'extraire de l'eau et se faneront de manière permanente. Il est comme une limite inférieure de l'eau extractible par la plante. Bien que le point de flétrissement permanent puisse quelque peu varier pour des cultures différentes, pour l'âge de la plante, et pour la distribution des racines, on considère généralement que la teneur en eau du sol à la matrice potentiel de -1.5MPa (pF 4.2) est une valeur représentative pour le point de flétrissement permanent.

- **Conductivité hydraulique à saturation (K_{sat})**

La conductivité hydraulique (*saturated hydraulic conductivity*) exprime la propriété du sol à conduire de l'eau à travers un sol. Quand le sol est saturé, tous les pores sont remplis d'eau et la valeur de la conductivité hydraulique est au maximum. La conductivité hydraulique saturée ou la perméabilité définissent le taux pour une couche de sol de transmettre de l'eau à travers le sol saturé sous l'influence de la gravité.

- **Eau totale disponible dans le sol (TAW) et le coefficient de drainage (τ).**

A partir des caractéristiques hydrauliques indiquées, AquaCrop détermine pour chaque horizon de sol, la quantité d'eau totale du sol (TAW ; *total available amount of soil water*) qui est disponible pour : la transpiration de la culture, et le coefficient de drainage (τ). TAW est la quantité d'eau contenue dans le sol entre la capacité au champ et le point de flétrissement permanent. Le coefficient dimensionnel de drainage est utilisé pour la simulation du mouvement d'eau vers le bas dans le profil de sol (Chapitre 3).

2.13.2 Valeurs indicatives pour les caractéristiques physiques du sol

La quantité d'eau restant dans le sol à la saturation et à la capacité au champ varie avec la texture de sol, le contenu de matière organique et la structure. L'argile et le contenu de matière organique d'un horizon de sol définissent principalement la teneur en eau du sol au point de flétrissement permanent. La conductivité hydraulique à saturation (K_{sat}) ne varie pas seulement entre les types de sol, mais aussi pour un type de sol spécifique, une valeur de K_{sat} typique n'existe pas. Même dans une parcelle unique, il n'est pas rare de mesurer des variations assez importantes de K_{sat} dans l'espace et le temps en conséquence des variations dans la structure de sol, la densité apparente, l'activité biologique et la gestion de sol.

L'utilisateur peut se servir de valeurs indicatives fournies par AquaCrop pour divers classes de texture de sol (Tab. 2.13a), ou importer des données localement déterminées ou dérivées de texture de sol avec l'aide des fonctions de pédotransfert (Boîte 2.13). Les valeurs présentées dans le Tableau 2.13a ou obtenues avec l'aide des fonctions de pédotransfert sont seulement des valeurs indicatives. Ils ne sont pas destinés à remplacer des mesures.

En sélectionnant la commande **<Mise à jour des caractéristiques de type de sol>** (*update list of soil type characteristics*) dans le menu **Caractéristiques de profil de sol** (*soil profile characteristics*), des valeurs indicatives pour les caractéristiques hydrauliques du sol peuvent

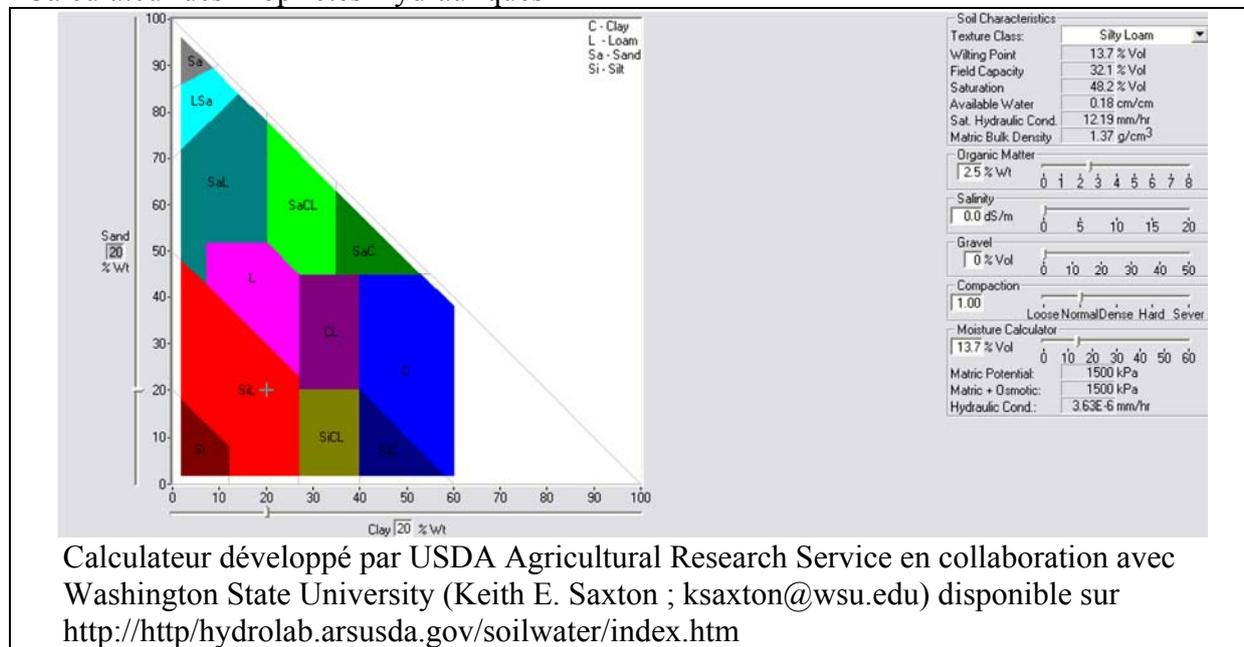
être mises à jour et les types de sol peuvent être ajoutés ou enlevés de la liste. Les caractéristiques sont stockées dans le fichier 'SOILS.DIR' du répertoire de AquaCrop.

Tableau 2.13a - Caractéristiques physiques du sol par défaut pour divers types de sol (classé dans SOILS.DIR)

Type de sol	Contenu d'eau du sol			Conductivité hydraulique à saturation
	Saturation	Capacité au champ	Point de flétrissement permanent	
	vol %	vol %	vol %	
Sable	36	13	6	1500
Sable terreux	38	16	8	800
Terreau sableux	41	22	10	500
Terreau	46	31	15	250
Terreau limoneux	46	33	13	150
Limoneux	43	33	9	50
Terreau argilo sableux	47	32	20	125
Terreau argileux	50	39	23	100
Terreau limono argileux	52	44	23	120
Argile sableuse	50	39	27	75
Argile limoneuse	54	50	32	15
Argile	55	54	39	2

Boîte 2.13

Caractéristiques d'eau du sol dérivées des fonctions de pédotransfert disponibles dans le Calculateur des Propriétés Hydrauliques



2.13.3 Caractéristiques de la couche de surface du sol

En spécifiant des données de sol pour l'horizon supérieur, les valeurs par défauts pour le modèle du Curve Number (Tab. 2.13b) et l'eau facilement évaporable sont dérivées et présentées (Fig. 2.13b).

- La valeur de Curve Number (CN) est exigée pour la simulation du ruissellement superficiel (*surface runoff*) (voir Chapitre 3), et sa valeur se réfère à la valeur pour la classe d'humidité antécédente II (AMCII)
- L'eau facilement évaporable (REW ; *readily evaporable water*) exprime la quantité d'eau qui peut être évaporée de la couche de surface du sol dans une phase d'énergie limitée (voir Chapitre 3).

L'utilisateur peut spécifier des valeurs autres que les valeurs par défaut présentées pour CN et REW si des informations spécifiques sur la surface du sol sont disponibles.

Tableau 2.13b - Valeurs de CN par défaut pour différentes conductivités hydrauliques à saturation pour l'horizon de surface

Conductivité hydraulique saturée (K_{sat}) mm/jour	Valeur par défaut de CN pour AMC II
>250	65
250 – 50	75
50 – 10	80
<10	85

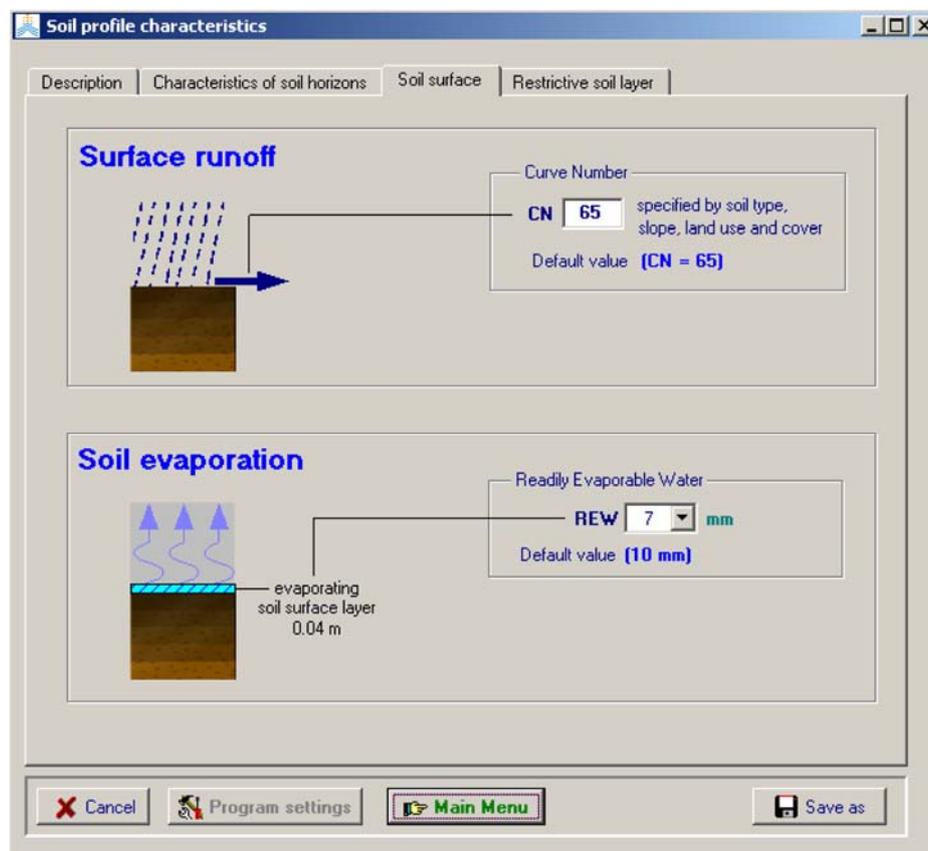


Figure 2.13b - Caractéristiques de la couche de surface du sol

2.13.4 Couche de sol restrictive

Si une couche de sol imperméable bloque le développement des racines, l'utilisateur spécifie sa profondeur (Fig. 2.13c). L'expansion de la zone racinaire est interrompue une fois que la couche de sol restrictive est atteinte (voir 2.9.2 Développement et 2.9.3 Évapotranspiration). Si aussi le mouvement d'eau est gêné, dépendant des caractéristiques des horizons de sol au-dessous de la couche restrictive (section 2.13.1).

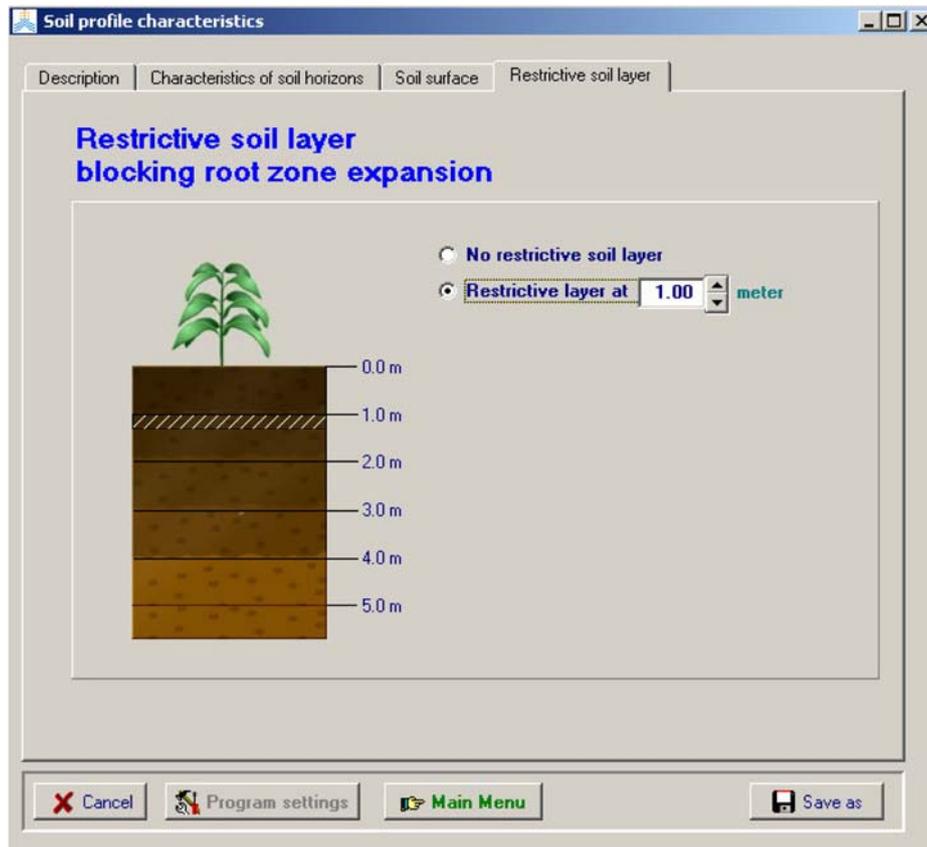


Figure 2.13c - Couche de sol bloquant l'expansion de la racine

2.13.5 Remontée capillaire

Dans l'onglet 'Remontée Capillaire' (*capillary rise*) l'utilisateur peut étudier le flux ascendant maximal possible vers la couche de surface pour divers profondeurs de la nappe phréatique (Fig. 2.13d). Si le gradient potentiel d'eau dans le profil de sol n'est pas assez fort, la remontée capillaire sera plus petite que prévue (voir Chapitre 3).

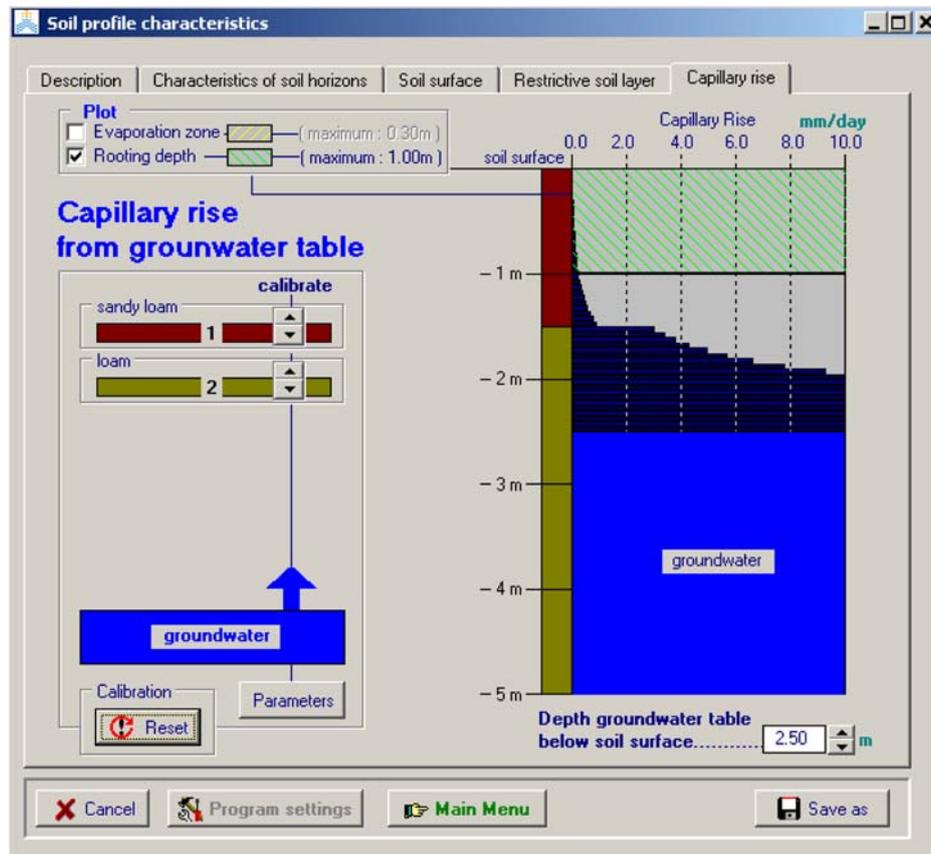


Figure 2.13d - L'onglet 'Remontée capillaire' (*capillary rise*) dans le menu *Caractéristiques du profil de Sol* (*soil profile characteristics*)

La remontée capillaire maximale est calculée avec une équation exponentielle (Chapitre 3). Les paramètres par défaut a et b , décrivant la remontée capillaire pour chaque horizon de sol, sont obtenus en considérant la classe du type de sol et la conductivité hydraulique saturée. Avec les boutons, l'utilisateur peut calibrer les paramètres a et b pour chaque horizon de sol et faire correspondre le flux ascendant maximal possible observé avec la remontée capillaire simulée et tracée. En sélectionnant le bouton **<Paramètres>** (*parameters*), les valeurs calibrées et par défaut pour les paramètres a et b sont présentées. En cliquant sur le bouton **<Réinitialiser>** (*reset*), l'utilisateur annule le calibrage, et les paramètres a et b sont réinitialisés à leurs valeurs par défaut.

2.13.6 Paramètres de configuration du programme

Du menu **Caractéristiques de profil de sol** (*soil profile characteristics*), l'utilisateur a accès aux paramètres de programmes affectant la simulation du ruissellement, de la salinité du sol et de la remontée capillaire (Tab. 2.13c).

Tableau 2.13c - Paramètres de configuration du programme affectant le ruissellement et la salinité du sol

Symbole	Paramètre de programme	Défaut
	Ruissellement (surface runoff)	
	- Ajustement de la valeur de CN à l'humidité relative de la couche supérieur du sol (les valeurs de CN pour les trois différentes classes d'humidité antécédentes (AMC) sont présentées).	Oui
	- L'épaisseur par défaut de la couche supérieur de sol à considérer pour la détermination de son humidité (exigé pour la détermination de AMC)	30 cm
	Salinité du sol (soil salinity)	
	- Facteur de diffusion de sel (exprimant la capacité de diffusion de sel dans la matrice du sol)	20 %
	- Solubilité de sel	20 g/litre
	Remontée capillaire (capillary rise)	
	Facteur de forme pour l'effet du gradient de la teneur en eau du sol sur la remontée capillaire	16

2.14 Caractéristiques de l'eau souterraine

Les caractéristiques de l'eau souterraine peuvent être présentées dans *Affichage des caractéristiques de l'eau souterraine* (*display of groundwater characteristics*) et mises à jour dans le menu *Caractéristiques de l'eau souterraine* (*groundwater characteristics*). L'utilisateur peut choisir entre la présence ou l'absence de nappe phréatique. Les caractéristiques considérées de la nappe phréatique sont sa profondeur au-dessous de la surface du sol, et sa salinité.

2.14.1 Profondeur et salinité constantes

Si les caractéristiques restent constantes durant la saison, l'utilisateur spécifie la profondeur et la salinité de la nappe d'eau (Fig. 2.14a). Les caractéristiques sont graphiquement présentées dans une portion de la feuille du tableau.

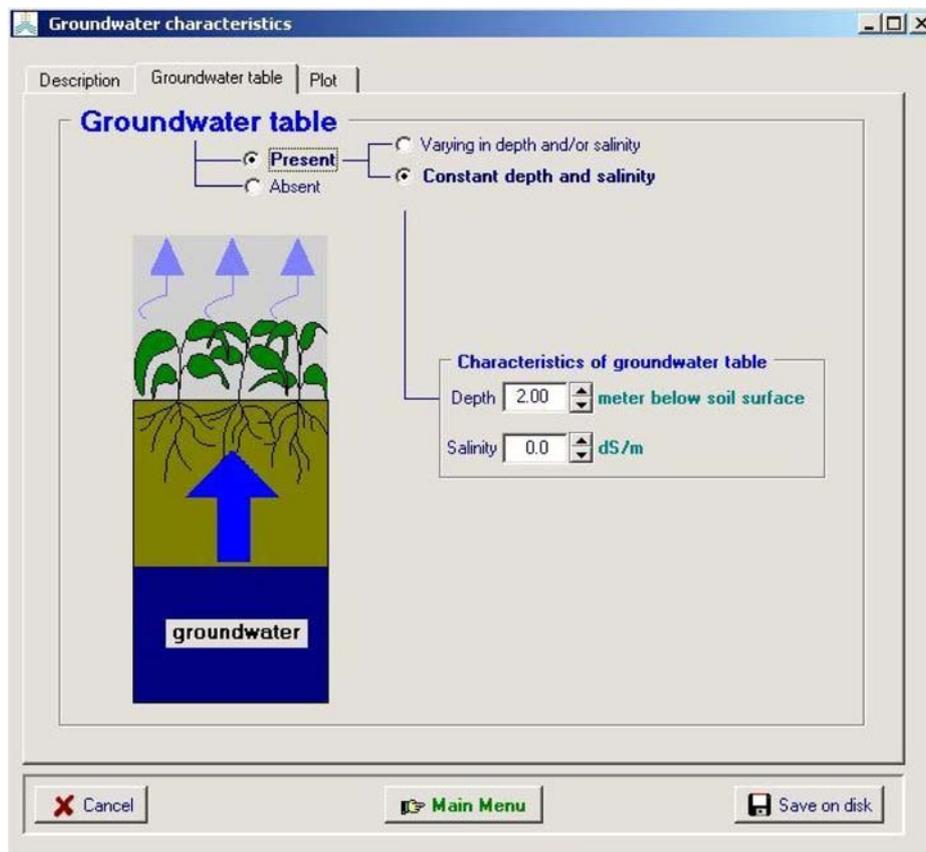


Figure 2.14a - Spécification des caractéristiques constantes d'une nappe phréatique dans l'onglet eau souterraine du menu *Caractéristiques de l'eau souterraine* (*groundwater characteristics*)

2.14.2 Caractéristiques variables tout au long de l'année

Les caractéristiques peuvent varier tout au long de l'année. Les caractéristiques sont spécifiées dans l'onglet du tableau des eaux souterraines (Fig. 2.14b et 2.14d) et sont graphiquement présentées dans l'onglet *Plot* (Fig. 2.14c et 2.14e). Les caractéristiques de la nappe phréatique pour des jours intermittents seront obtenues au moment de l'exécution de la simulation par le biais d'une interpolation linéaire.

- **Les caractéristiques ne sont pas liées à une année spécifique**

Si les caractéristiques ne sont pas liées à une année spécifique, l'interpolation linéaire s'applique aussi entre les caractéristiques indiquées sur le dernier et premier jour (Fig. 2.14b et 2.14c).

The screenshot shows the 'Groundwater characteristics' window with the 'Groundwater table' tab selected. The 'Present' radio button is selected, and the 'Varying in depth and/or salinity' sub-option is also selected. The 'Salinity of groundwater' section shows 'EC_gwt' set to 0.0 dS/m. The 'First day of observations' section is set to 'Not linked to a specific year' with a dropdown menu showing '1' and 'January'. The table below contains the following data:

	When ?	Depth	Salinity
	day number	meter	dS/m
1	1 March	60	1.0
2	10 April	100	2.0
3	19 July	200	3.0
4	27 October	300	1.0
5			

Figure 2.14b - Spécification des caractéristiques variables d'une nappe phréatique non liée à une année spécifique (*not linked to a specific year*) dans le menu *Caractéristiques de l'eau souterraine* (*groundwater characteristics*)

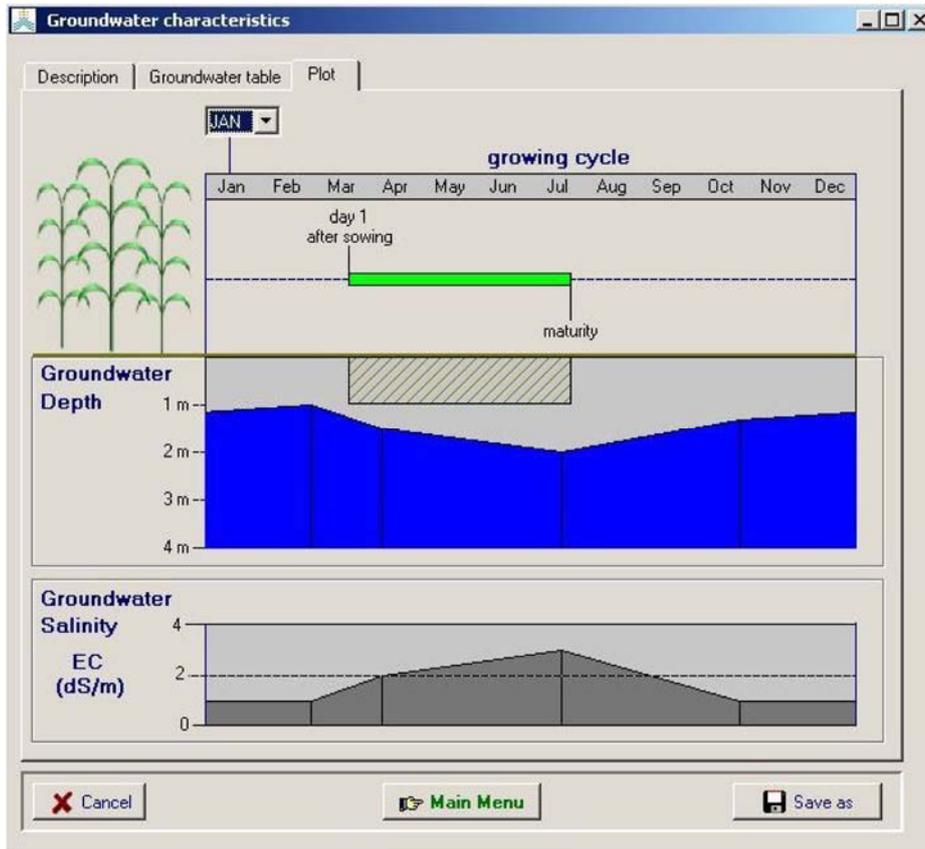


Figure 2.14c - Présentation graphique des caractéristiques variables d'une nappe phréatique non liée à une année spécifique dans le menu de *Caractéristiques de l'eau souterraine* (*groundwater characteristics*)

- **Caractéristiques liée(s) à une (aux) année(s) spécifique(s)**

Si les caractéristiques sont liées à des années spécifiques, l'interpolation linéaire est appliquée seulement entre les jours où les caractéristiques sont indiquées (Fig. 2.14d et 2.14e). Les caractéristiques pour les jours avant la première spécification sont identiques à ces premières caractéristiques. Les caractéristiques indiquées sur le dernier jour restent valable pour tous les jours suivants.

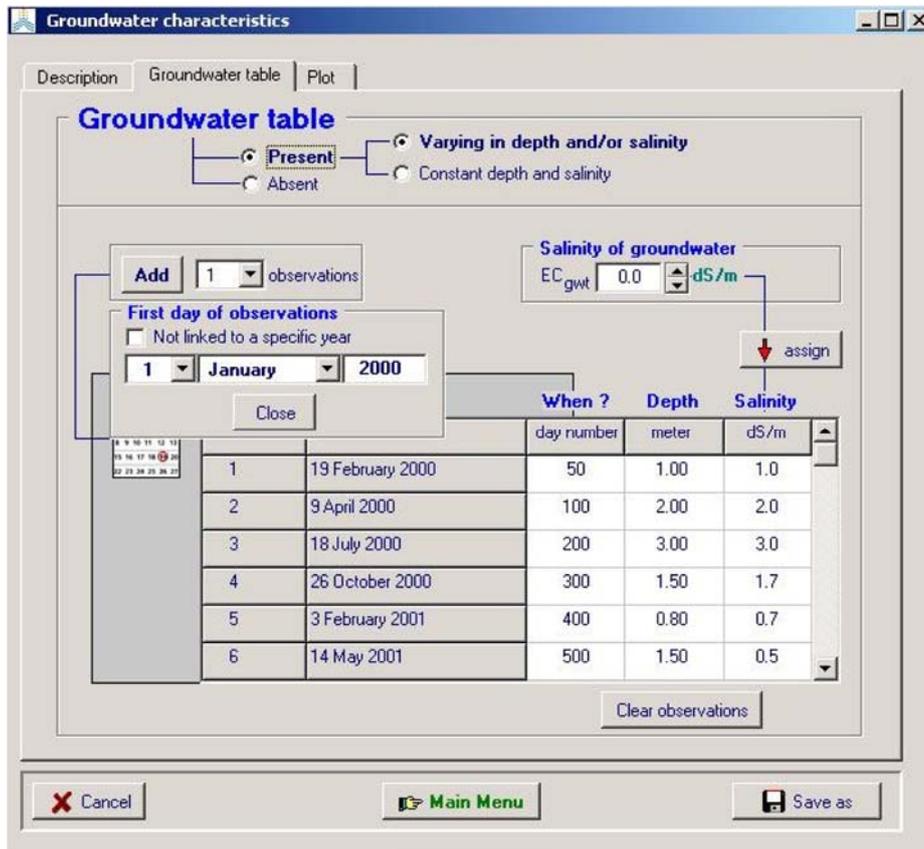


Figure 2.14d - Spécification des caractéristiques variables d'une nappe phréatique liée à une année spécifique dans le menu *Caractéristiques de l'eau souterraine*.

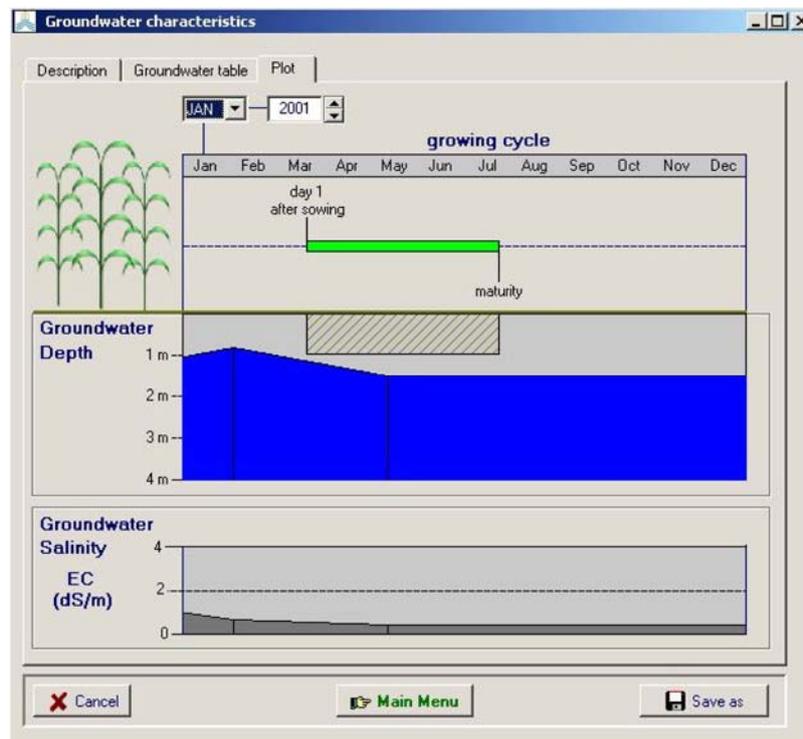
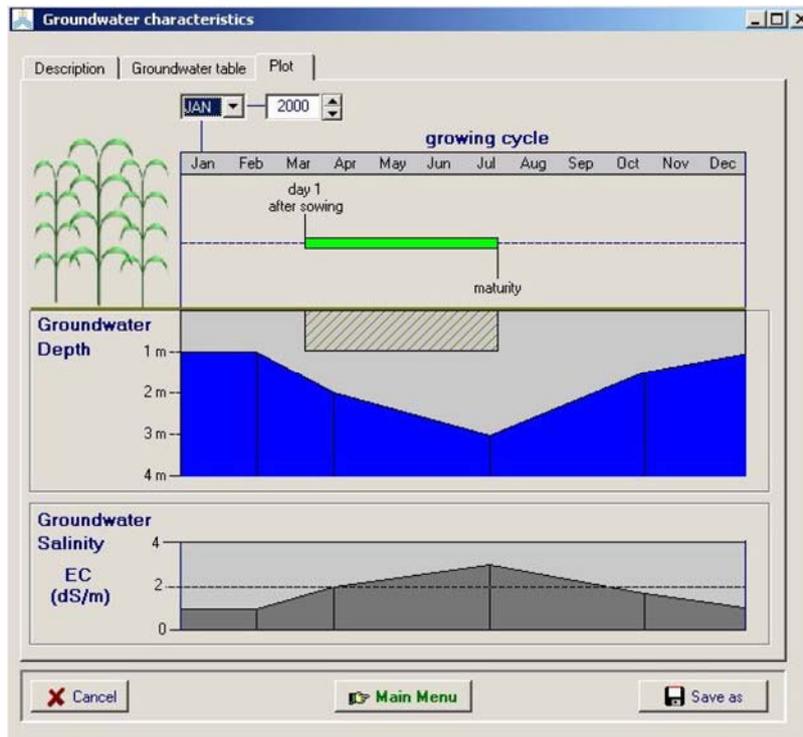


Figure 2.14e - Présentation graphique des caractéristiques variables d'une nappe phréatique liée aux années spécifiques (2000 et 2001) dans le menu *Caractéristiques de l'eau souterraine (groundwater characteristics)*

2.15 Période de simulation

La période de simulation choisie peut être affichée dans le menu *Présentation de la période de simulation* (*display of simulation period*) et ajustée dans le menu *Période de Simulation* (*simulation period*) (Fig. 2.15). La longueur du cycle de croissance et la plage de données climatiques disponibles sont données comme références dans le menu.

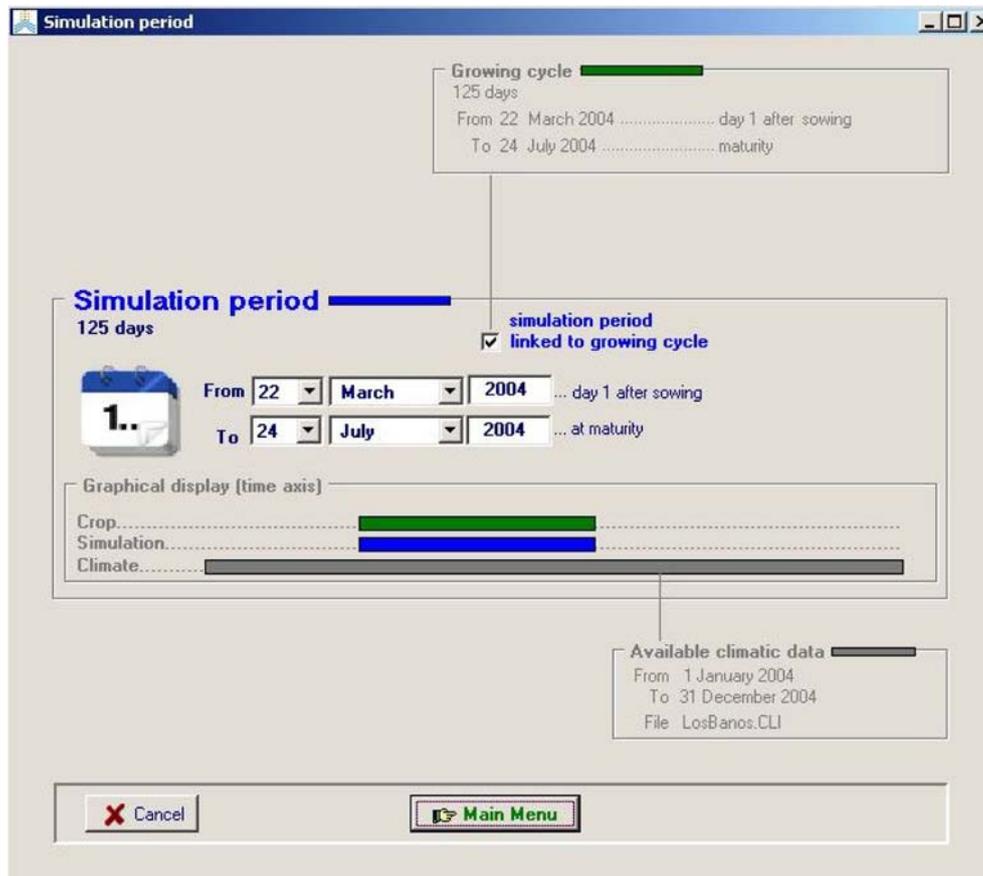


Figure 2.15 - Spécification de la période de simulation dans le menu *Période de simulation*

L'utilisateur ajuste la portée de la période de simulation en spécifiant le premier et le dernier jour, le mois, et éventuellement l'année. La période de simulation choisie peut être plus courte, plus longue ou lié au cycle de croissance, tant que la période ne dépasse pas la plage des données climatiques. Si aucun fichier climatique n'est sélectionné, l'utilisateur peut sélectionner toute période de simulation, mais devra spécifier les données climatiques au moment de l'exécution.

La graphique dans le menu, présente sur un axe de temps (i) la longueur de la période de croissance de la culture (*Crop*), (ii) la période de simulation choisie (*Simulation*) et (iii) la période pour laquelle des données climatiques sont disponibles (*Climate*).

2.16 Conditions initiales

Les informations utilisées par AquaCrop au début de chaque simulation peuvent être affichées dans le menu *Présentation des conditions initiales* (*display of initial conditions*) et ajustées dans le menu *Conditions initiales* (*initial conditions*) (Fig. 2.16a).

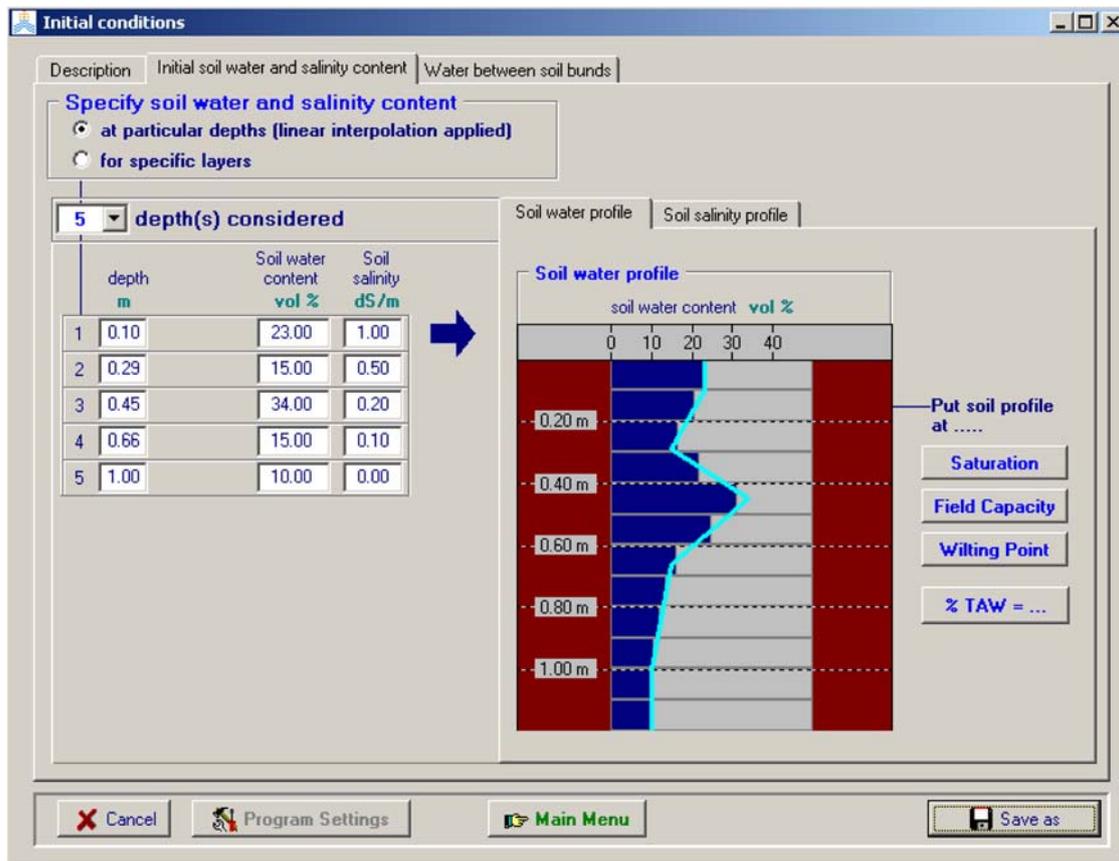


Figure 2.16a - Spécification de la teneur en eau initiale du sol dans le menu *Conditions initiales* (*initial conditions*)

2.16.1 Teneur en eau initiale

La teneur en eau du sol au début de la simulation peut être ajustée par (i) la spécification de la teneur en eau du sol à des profondeurs spécifiques du profil de sol, (ii) la spécification pour des couches spécifiques, ou par (iii) les paramètres de profil de sol à la saturation, la capacité au champ, le point de flétrissement, ou au pourcentage spécifique de TAW (disponibilité totale en eau du sol).

Les conditions initiales d'eau du sol sont fortement déterminées par les conditions climatiques (ET_0 et pluie) et des irrigations appliquées dans la période précédant la période de simulation. Si la période de simulation commence à la fin d'une saison très pluvieuse, la teneur en eau du profil de sol pourrait être proche de la capacité au champ. Si la simulation commence en saison sèche et chaude, la couche de sol en surface pourrait être humidifiée par une pré-irrigation mais le sous-sol sera sec et la teneur en eau près du point de flétrissement.

2.16.2 Salinité initiale du sol

La salinité du sol au début de la simulation peut être ajustée par (i) la spécification de la conductivité électrique de l'extrait de la pâte saturée de sol (ECe) à des profondeurs spécifiques du profil de sol, (ii) la spécification pour des couches spécifiques, ou par (iii) la spécification de tout le profil de sol à une ECe spécifique.

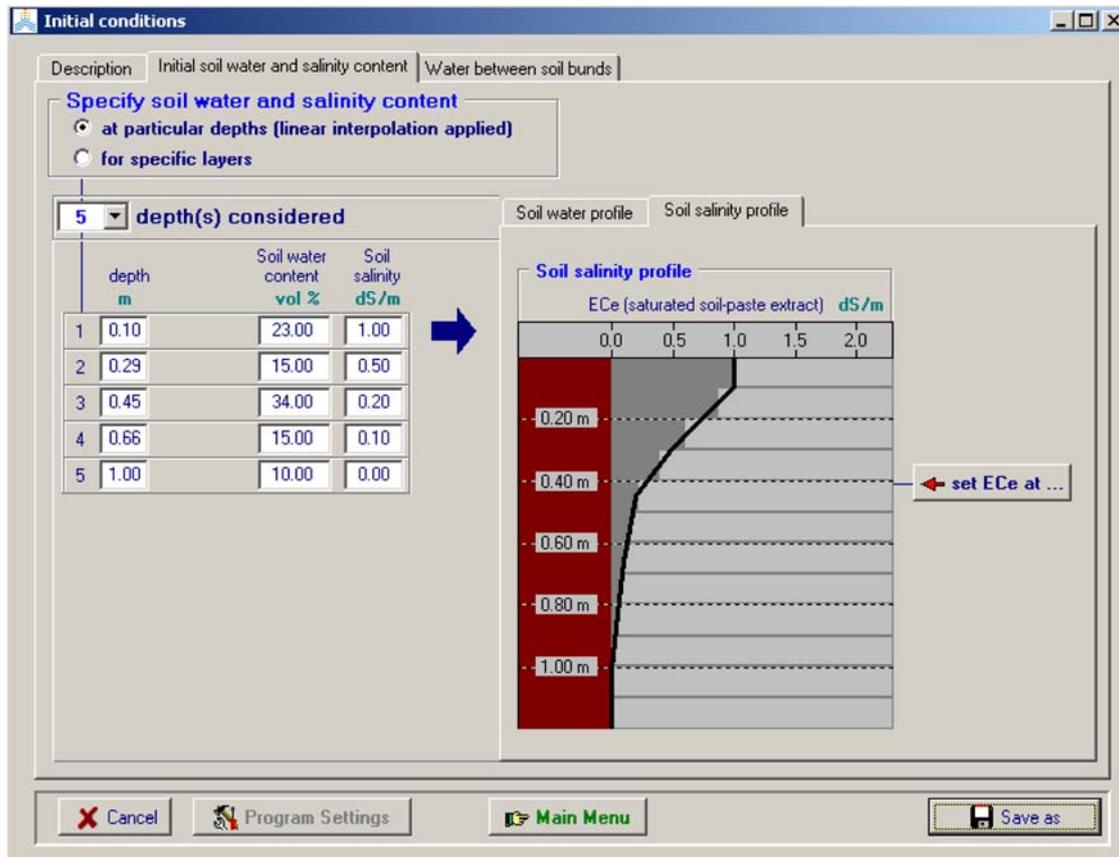


Figure 2.16b - Spécification de la salinité initiale dans le profil de sol du menu *Conditions initiales*

2.16.3 L'eau entre diguettes

Si la parcelle est entourée par des diguettes (voir 2.12 Gestion de terrain) l'épaisseur de la couche d'eau au-dessus de la surface du sol et la qualité de cette eau au début de la simulation peuvent être spécifiées (Fig. 2.16c).

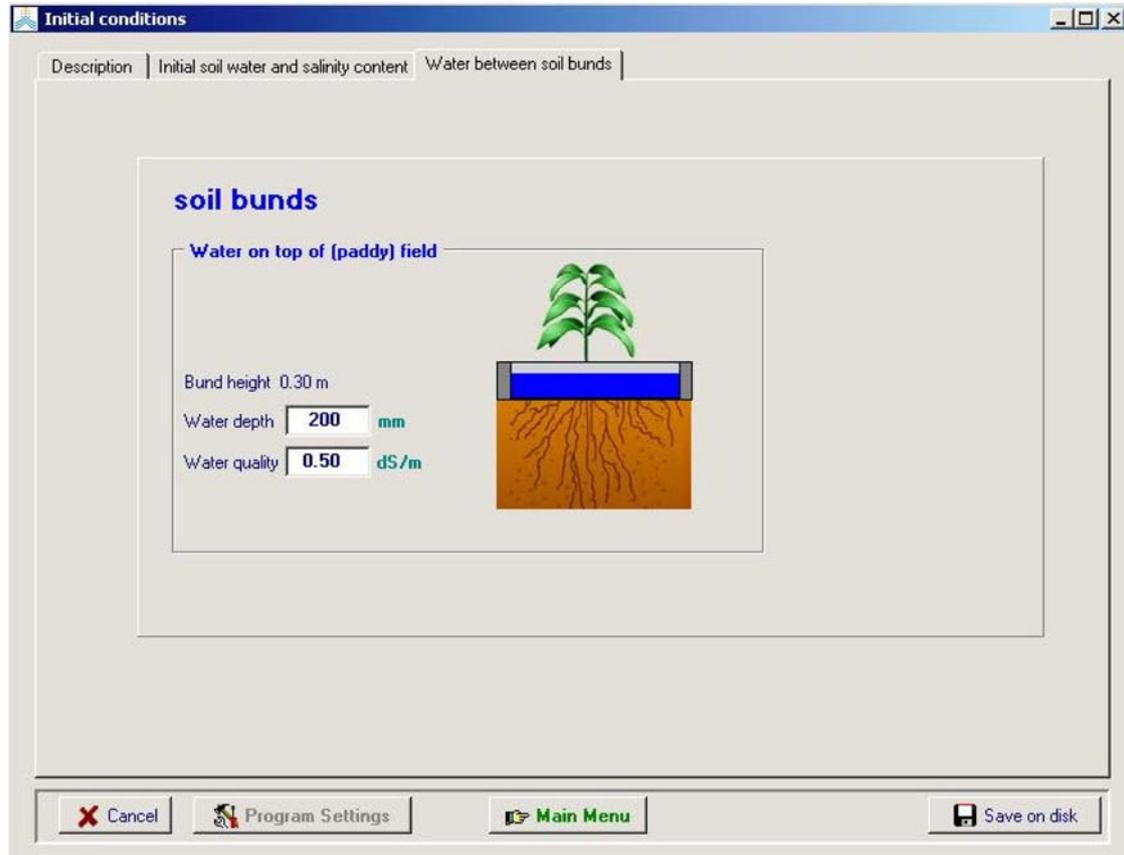


Figure 2.16c - Spécification de l'épaisseur et de la qualité de l'eau entre les diguettes au début de la simulation dans le menu *Conditions Initiales*

2.16.4 Paramètres de configuration du programme

Dans les paramètres de configuration du programme, l'utilisateur peut ajuster le nombre et la taille des compartiments du sol et changer le réglage défini en début de la simulation.

- **Compartiments du sol**

Pour décrire précisément la rétention et le mouvement d'eau et de sels dans le profil de sol au cours de la période de croissance, AquaCrop divise le profil de sol en petites fractions (voir bilan d'eau du sol dans le Chapitre 3). Le profil de sol est divisé en des compartiments du sol (12 par défaut) avec une épaisseur ΔZ (0.10 m par défaut). Cependant, après la sélection de la culture, AquaCrop ajustera la taille des compartiments pour couvrir entièrement la zone racinaire si la profondeur maximale d'enracinement excède 1.20 mètres. Pour des zones racinaires profondes, ΔZ n'est pas constant, mais augmente exponentiellement avec la profondeur, de sorte que l'infiltration, l'évaporation du sol et la transpiration de la culture des couches supérieures du sol, puissent être décrites avec suffisamment de détails. Les caractéristiques hydrauliques de chaque compartiment sont ceux de l'horizon du sol auquel ils appartiennent. Dans les paramètres de configuration du programme, l'utilisateur a la possibilité de remplacer les paramètres d'AquaCrop en ajustant le nombre et l'épaisseur des compartiments du sol.

- **Paramètres au début de la simulation**

En commençant une nouvelle simulation, la teneur en eau du sol et les conditions de salinité du sol dans le profil de sol sont par défaut restaurées aux conditions initiales indiquées (voir 2.16.1 et 2.16.2). Cela s'applique quand des simulations successives ne sont pas liées au temps, ou quand les simulations s'appliquent à des parcelles différentes. Avec l'option 'Sauvegarde' la teneur en eau et la salinité du sol à la fin d'une simulation deviennent la teneur en eau du sol et/ou la salinité du sol au début de la simulation suivante. Ceci suppose que les diverses simulations se réfèrent tous à une parcelle précise et sont successives dans le temps (une culture est cultivée après la récolte d'une autre sur la même parcelle). Il est évident que dans de tels cas l'utilisateur ne peut plus changer le type de sol.

2.17 Conditions hors-saison

Si la période de simulation (voir 2.15 période de Simulation) n'est pas entièrement liée au cycle de croissance, mais commence avant la plantation ou le semis de la culture, ou se termine après la maturité, les conditions de gestion en dehors du cycle de croissance doivent être considérées. L'information utilisée par AquaCrop dans les conditions d'hors-saison (par exemple la présence de paillis, la présence d'irrigations et la qualité de l'eau d'irrigation en dehors du cycle de croissance) peut être affichée dans le menu *Présentation de conditions hors-saison* (*display of off-season conditions*) et ajustée dans le menu *conditions hors-saisons* (*off-season conditions*) (Fig. 2.17a et 2.17b).

2.17.1 Paillis en hors-saison

La couverture du sol (paillis ; *mulches off-season*) d'une terre en jachère avant et/ou après le cycle de croissance et le type de paillis peuvent être spécifiés (Fig. 2.17a). La couverture du sol réduira les pertes par évaporation de la terre non cultivée.

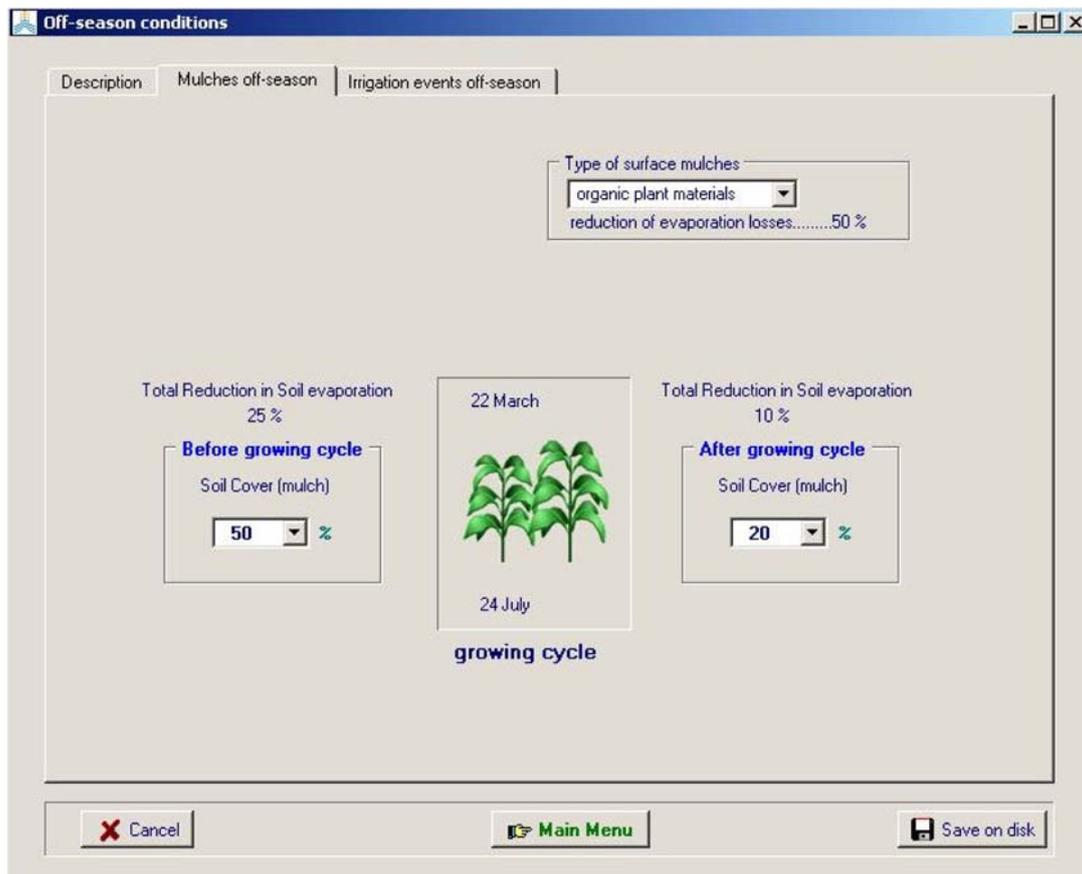


Figure 2.17a - Spécification de paillis dans le menu *Conditions hors-saison* (*off-season conditions*)

2.17.2 Irrigations en hors-saison

L'irrigation peut être programmée avant et après le cycle de croissance (*irrigation events off-season*) (Fig. 2.17b). Cela permet aux utilisateurs de simuler une pré-irrigation avant le semis ou le repiquage de la culture, ou de programmer l'irrigation en dehors de la saison de culture pour débarrasser la zone racinaire des sels accumulés. La qualité de l'eau d'irrigation, qui pourrait être différente de celle dans la saison de culture, est spécifiée par la sélection d'une classe de qualité d'eau d'irrigation (Tab. 2.17) ou en spécifiant une valeur pour la conductivité électrique de l'eau d'irrigation.

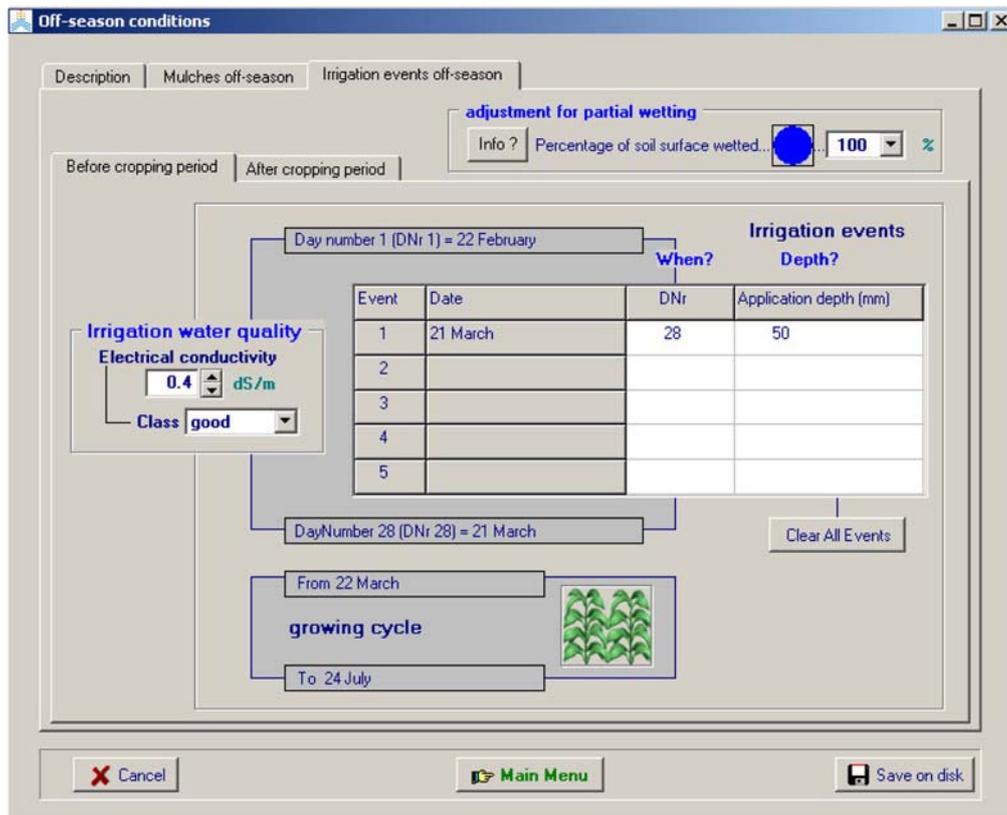


Figure 2.17b - Spécification d'une pré-irrigation dans le menu *Conditions hors-saison (off-season conditions)*

Tableau 2.17 - Classes et valeurs par défaut pour la qualité de l'eau d'irrigation

Classe Qualité de l'eau d'irrigation	Conductivité électrique (dS/m)	
	Valeur par défaut	Plage
excellente	0	0.0 - 0.2
bonne	0.4	0.3 - 1.0
modérée	1.0	1.1 - 2.0
pauvre	1.7	2.1 - 3.0
très pauvre	2.5	>3.0

2.18 Caractéristiques de projet

Lorsque l'on procède à une simulation, on prend en compte les conditions initiales applicables au début de la période de simulation ainsi que les conditions environnementales pertinentes lors d'une simulation. Si la période de simulation ne coïncide pas entièrement avec le cycle de croissance de la culture, les conditions hors-saison valables en dehors de la période de croissance seront également prises en compte. Avant de procéder à une simulation, l'utilisateur peut préciser dans le menu principal, la date de semis, la période de simulation, et les conditions environnementales, initiales et hors-saison appropriées. (Le fichier du projet est 'Aucun'). L'utilisateur peut aussi charger un dossier de projet comportant toutes les informations nécessaires concernant cette simulation.

Une fois que le fichier du projet est choisi, ses caractéristiques peuvent être présentées dans le menu *Affichage des caractéristiques de projet* (*display of projet characteristics*) et ajustés dans le menu *Caractéristiques de projet* (*project characteristics*). Dès que le fichier du projet est choisi, les commandes *<Choisir/Créer>* (*select/create*) et *<Afficher/Actualiser>* (*display/update*) pour climat, culture, irrigation, parcelle, profil de sol, eau souterraine, conditions initiales et hors-saison ne sont plus disponibles dans le *Menu Principal* (*main menu*) (Fig. 2.18a). En cliquant sur la commande *<ANNULER la sélection>* (*undo selection*), l'utilisateur retourne aux paramètres par défaut considérés au démarrage d'AquaCrop (voir 2.3 Paramètres par défaut au démarrage).

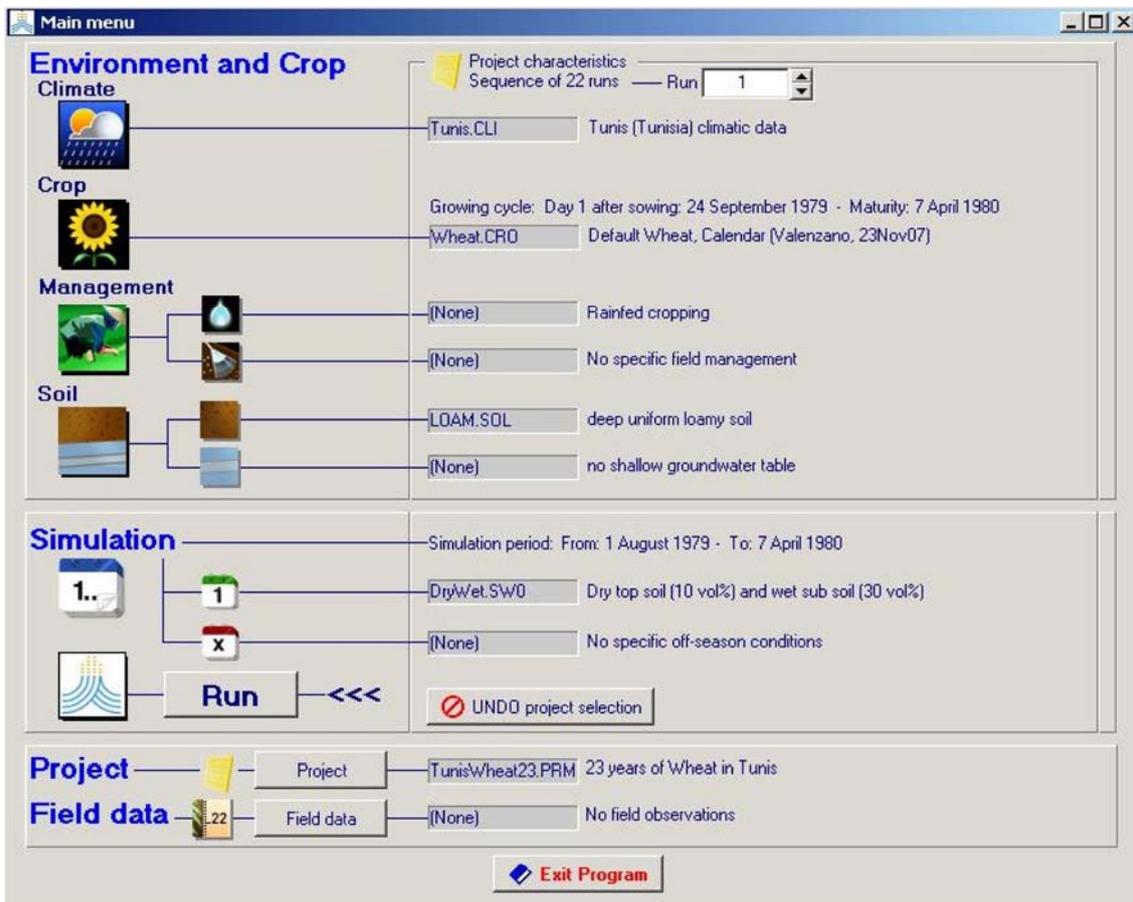


Figure 2.18a - *Menu Principal* (*main menu*) lorsque qu'un fichier projet est sélectionné

2.18.1 Simulation d'un projet individuel et de multiples projets

Une distinction est faite entre des projets qui contiennent les informations requises pour une seule simulation (avec 'PRO' comme extension de nom de fichier), et des projets qui consistent en un ensemble de simulations consécutives, de tels sont appelés projets de simulations multiples (avec 'PRM' comme extension de nom de fichier).

Avec un projet de simulations multiples, l'utilisateur peut évaluer les effets des conditions climatiques (la pluviométrie, la demande évaporatoire, et la température de l'air) sur le développement et la production de la culture en procédant à une simulation particulière pour un nombre d'années successives. Un projet de simulations multiples peut aussi être utilisé pour simuler une rotation des cultures (cultures successives).

Un fichier projet comprend:

- La ou les périodes du cycle de croissance (du premier jour de semis/transplantation à la maturité de la culture);
- La ou les périodes de la simulation: le premier et dernier jour ne doivent pas forcément coïncider avec le cycle de croissance;
- Les noms des fichiers (avec leurs répertoires) contenant les caractéristiques de l'environnement choisi (climat, culture, gestion de l'irrigation, gestion de parcelle, profil de sol et eau souterraine);
- Les noms des fichiers (avec leurs répertoires) contenant les conditions initiales et hors-saison, et
- Les paramètres spécifiques du programme pour le(s) simulation(s).

Si aucun nom de fichiers n'est spécifié, les conditions par défaut sont considérées (voyez 2.3 paramètres par défaut au démarrage).

2.18.2 Sélectionner et créer un projet

- Sélectionner un projet

Puisque les projets à simulation unique ou multiple ont des extensions de fichier différentes, la liste des fichiers de projets présentés dans le menu *Sélection de fichier projet* (*select project file*) dépend du type de projet sélectionné (Fig. 2.18b).

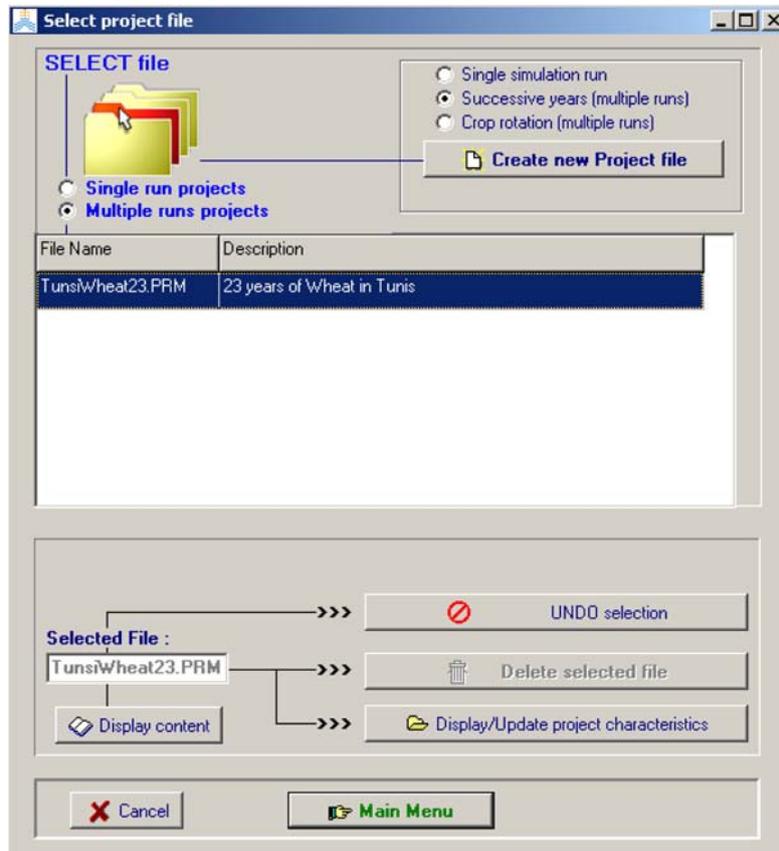


Figure 2.18b - Le menu *Choix du fichier projet* (*select projet file*) où l'utilisateur peut choisir un fichier dans une des listes de projets (projets à simulation unique ou multiple) et peut indiquer quel type de projet doit être créé (simulation unique ; années successive (simulations multiples) (*single simulation run* ; *successive years – multiple runs*) ; rotation des cultures (simulations multiples) (*crop rotation – multiple runs*))

- **Créer un projet**

Pour la création d'un nouveau fichier projet, l'utilisateur précise le type de fichier :

- Exécution d'une simulation unique (*single simulation run*) ;
- Années successives (simulations multiples) (*successive years – multiple runs*) ; ou
- Rotation des cultures (simulations multiples) (*crop rotation – multiple runs*).

Créer un projet (simulation unique)

L'utilisateur choisi :

- le fichier Climat ;
- le fichier Culture, et précise
 - le premier jour de semis/plantation, ou
 - un critère (voir 2.10.2 Début généré) pour générer un jour de démarrage (disponible seulement si le fichier climat est sélectionné) ;
- le fichier Irrigation ;
- le fichier Gestion de parcelle ;
- le fichier Profil de sol ;
- le fichier Eau souterraine ;
- la période de simulation ;
- le fichier avec les conditions initiales ; et
- le fichier avec les conditions hors-saison (seulement disponible si la période de simulation n'est pas liée au cycle de croissance).

Le choix du cycle de croissance des cultures, et la période de simulation sont présentés à partir de la commande <**Calendrier**> (*calendar*).

Si aucun fichier n'est choisi, les conditions par défaut sont pris en compte (voir 2.3 paramètres par défaut au démarrage).

Créer un projet (simulations multiples) - années successives

L'utilisateur choisi :

- le fichier Climat ;
- le fichier Culture, et précise
 - le premier jour de semis/plantation, ou
 - un critère (voir 2.10.2 Début Généré) pour générer un jour de démarrage (seulement disponible si un fichier Climat est choisi) ; and
 - L'année du début de la série d'années successives
- le fichier commun d'irrigation ;
- le fichier commun Gestion de parcelle ;
- le fichier Profil de sol ;
- le fichier commun Eau souterraine ;
- la période de simulation en précisant :
 - le premier jour de la simulation initiale ;
 - les périodes des suivantes simulations (disponible seulement si un fichier Climat a été choisi) ;
- le fichier avec les conditions initiales ;
- les conditions initiales pour les prochaines simulations (disponible seulement si un fichier Climat est choisi)
- le dossier commun avec les conditions hors-saison (disponible seulement si la période de simulation n'est pas liée au cycle de croissance) ; et
- le nombre d'années.

La détermination des cycles de croissances des cultures et les périodes de simulation pour les années successives sont présentées par sélection de la commande <Calendrier> (Fig. 2.18c).

Si aucun fichier n'est choisi, les conditions par défaut sont prises en compte (voir 2.3 Paramètres par défaut au démarrage).

Si la gestion de l'irrigation, la gestion de la parcelle, et/ou le fichier conditions hors-saison ne sont pas communs au cours des années successives, la sélection peut être ajustée dans le menu *Caractéristiques de projet* (*projet characteristics*) (voir 2.18.3).

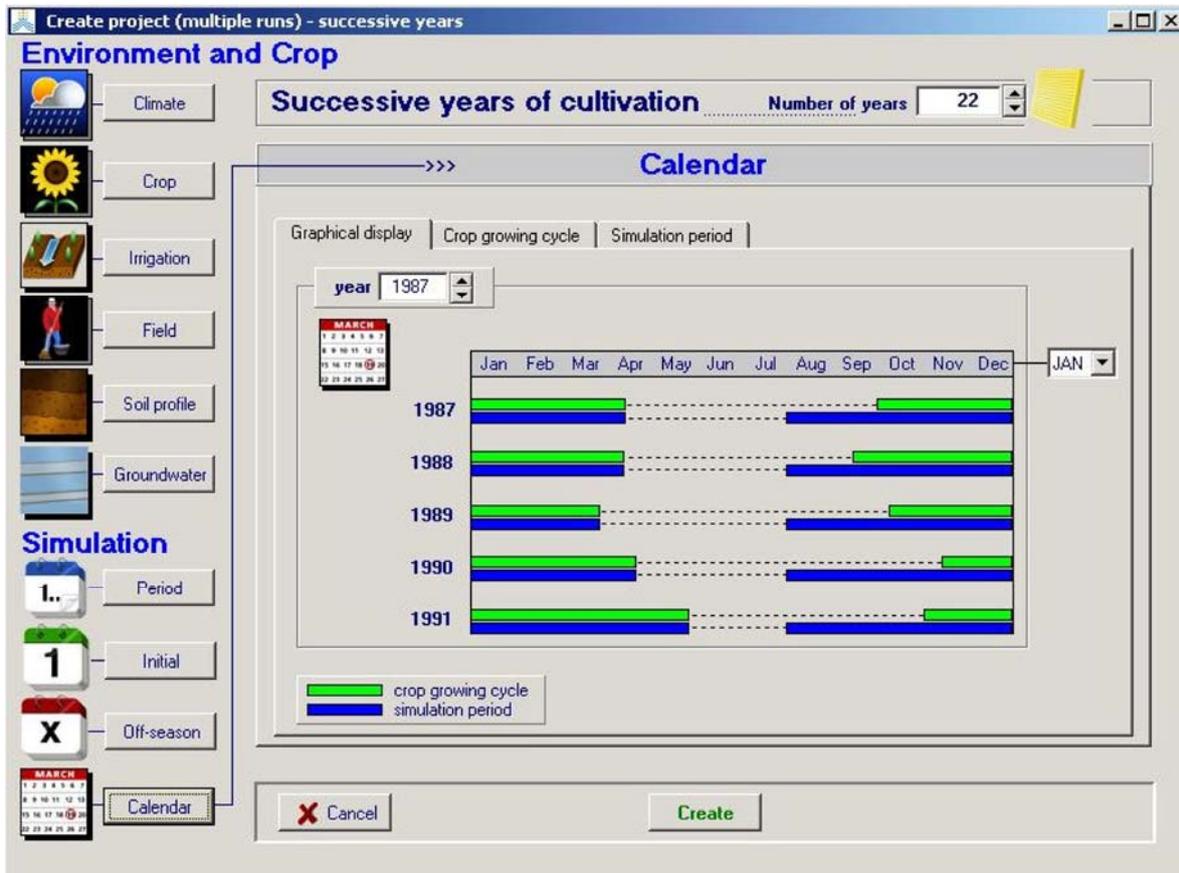


Figure 2.18c - Le calendrier dans le menu *Créer un projet (simulations multiples) - années successives* (*create project – multiple runs – successive years*), indiquant la détermination des cycles de croissance de la culture et les périodes de simulation pour les années successives

Création d'un projet (simulations multiples) - rotation des cultures

L'utilisateur choisi :

- le fichier Climat ;
- le nombre de culture, et précise pour chacune des cultures :
 - le fichier Culture ; et
 - le premier jour de semis/plantation (Fig. 2.18d)
- le fichier commun Irrigation ;
- le Fichier commun Gestion de parcelle ;
- Le Fichier Profil de sol ;
- le fichier commun Eau souterraine ;
- la période de simulation en précisant :
 - le premier jour de la simulation initiale ; et
 - les périodes des suivantes simulations (disponible seulement si un fichier Climat est choisi);
- le fichier avec les conditions initiales ;
- les conditions initiales pour les suivantes simulations (disponible seulement si un fichier Climat est choisi) ; et
- le fichier commun avec les conditions hors-saison (disponible seulement si la période de simulation n'est pas liée au cycle de croissance).

La détermination des cycles de croissance des cultures, et les périodes de simulation pour chacune des cultures de la rotation sont présentées via la commande **<Calendrier>**.

Si aucun fichier n'est choisi, les conditions par défaut sont prises en compte (voir 2.3 Paramètres par défaut au démarrage).

Si la gestion de l'irrigation, la gestion de la parcelle, la nappe souterraine et/ou le fichier conditions hors-saison ne sont pas communs dans la rotation des cultures, la sélection peut être adaptée dans le menu ***Caractéristiques du projet*** (*project characteristics*) (voir 2.18.3).

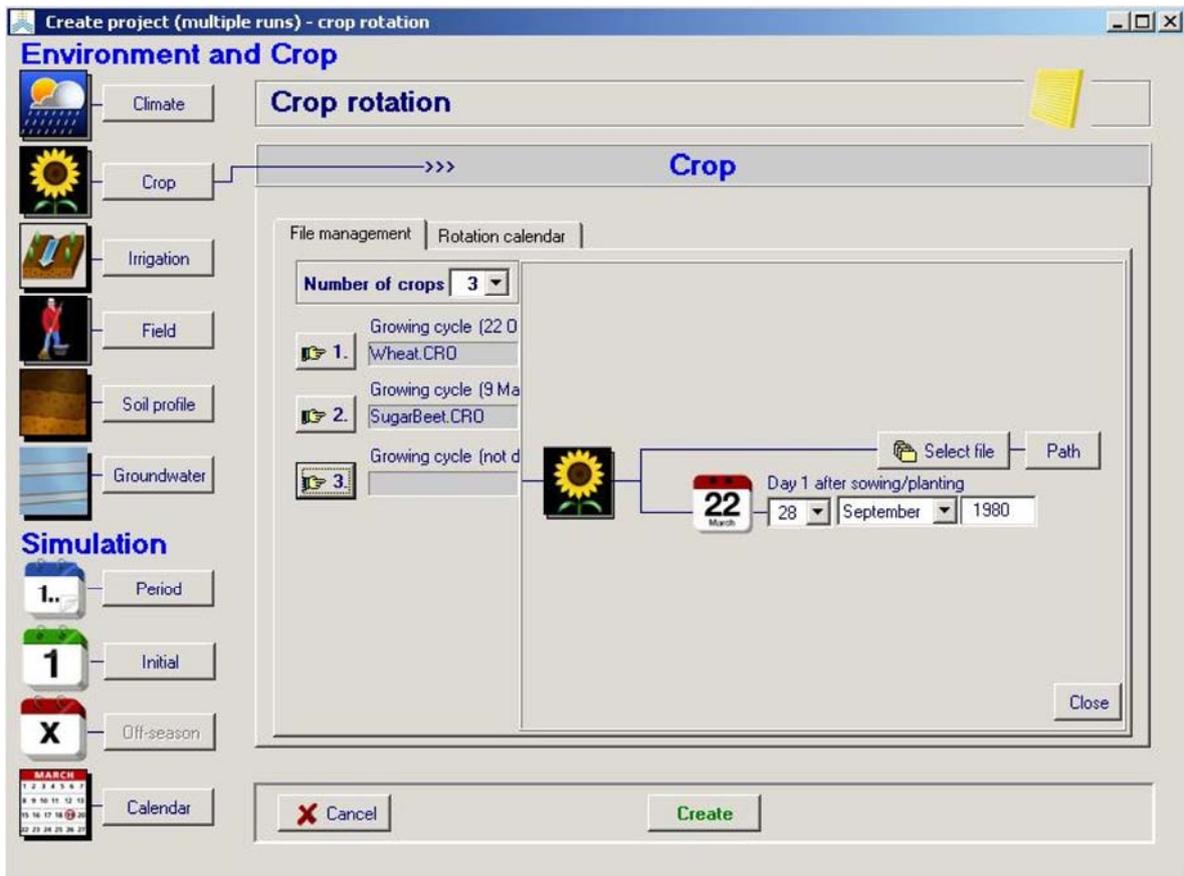


Figure 2.18d - Gestion des cultures dans le menu *Créer un projet (simulations multiples) - rotation des cultures (create project – multiple runs – crop rotation)*

2.18.3 Mise à jour des caractéristiques du projet

Dans le menu *Caractéristiques de projet* (Fig. 2.18e), l'utilisateur peut :

- choisir d'autres fichier(s) de Culture, d'Irrigations, de Gestion de parcelle, d'autres fichier(s) du Profil de sol, des eaux souterraines, de Conditions Initiales, et de(s) fichier(s) Conditions hors-saison.

Avec l'exception des fichiers Climat, Profil de sol et Culture (si les années successives sont prises en compte), les fichiers ne doivent pas forcément être communs entre les différentes simulations pour des projets à simulation multiple ;

- changer le début du cycle de croissance ;
- changer le début et la fin de la période de simulation ; et
- mettre à jour les paramètres de configuration du programme.

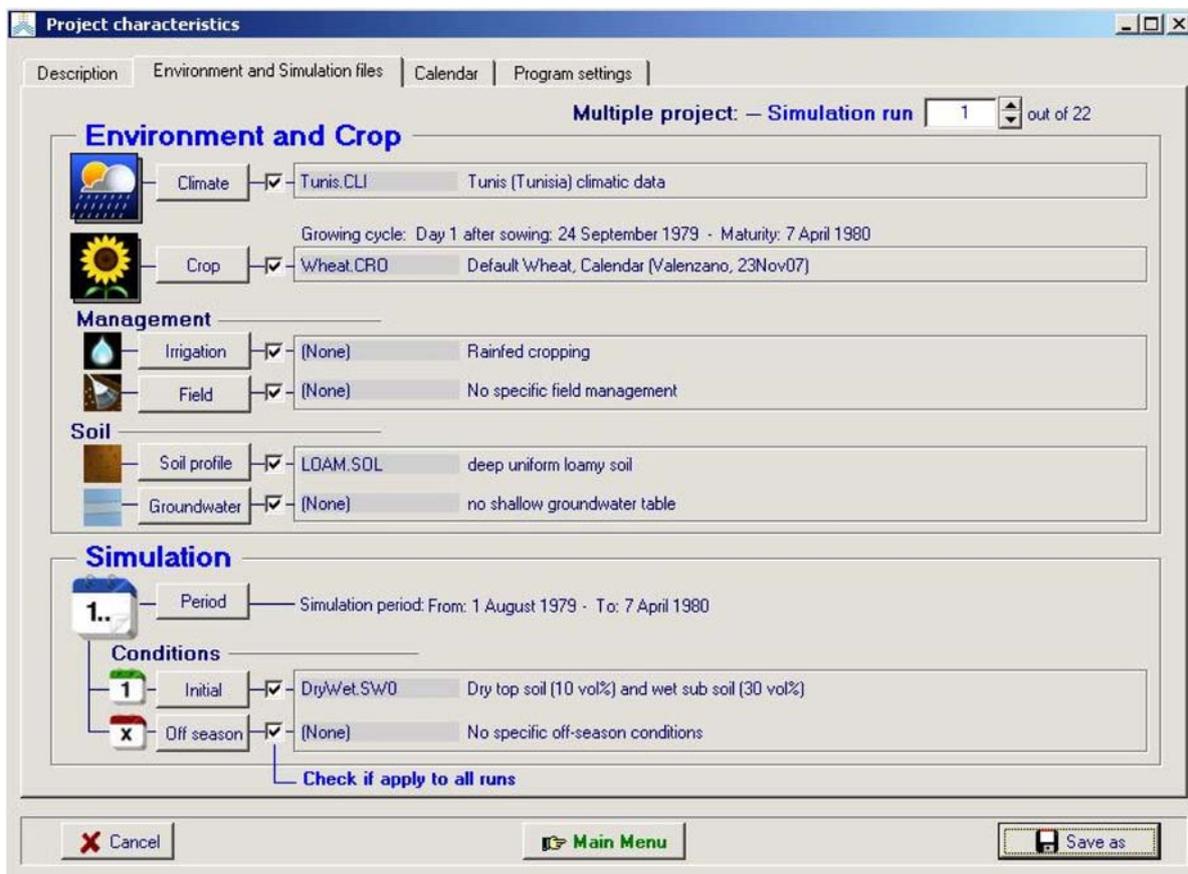


Figure 2.18e – Menu *Caractéristiques du projet* (project characteristics)

2.19 Données de terrain

2.19.1 Access aux menus des données de terrain

Après (i) la sélection de culture et la description de l'environnement (onglet *Environnement et Culture*), (ii) le choix de la Période de simulation, et les Conditions initiales et hors-saison (onglet *Simulation*), et (iii) le choix ou la description des projets, l'utilisateur peut entrer des données de terrain dans le **Menu Principal** (*main menu*) d'AquaCrop.

A l'aide de la commande **<Sélectionner/Créer un fichier d'observation>** (*select/create observation file*) du **Menu Principal** l'utilisateur a accès à la base de données où les fichiers de données sont enregistrés ou peut créer de nouveaux fichiers de données. La base de données par défaut est le sous-répertoire du dossier OBS d'AquaCrop. Avec la commande **<Répertoire>** (*path*), l'utilisateur peut spécifier d'autres répertoires.

A partir du **Menu principal**, l'utilisateur peut afficher les données de terrain observées dans le menu **Affichage de données de terrain** (*display of field data*), par un clic sur le nom du fichier ou l'icône correspondante dans le **Menu principal**. En choisissant la commande **<Afficher/Mettre à jour les données de terrain>** (*display/update field data*), les données de terrain peuvent être affichées, spécifiées ou mises à jour dans le menu **Données de terrain** (*field data*).

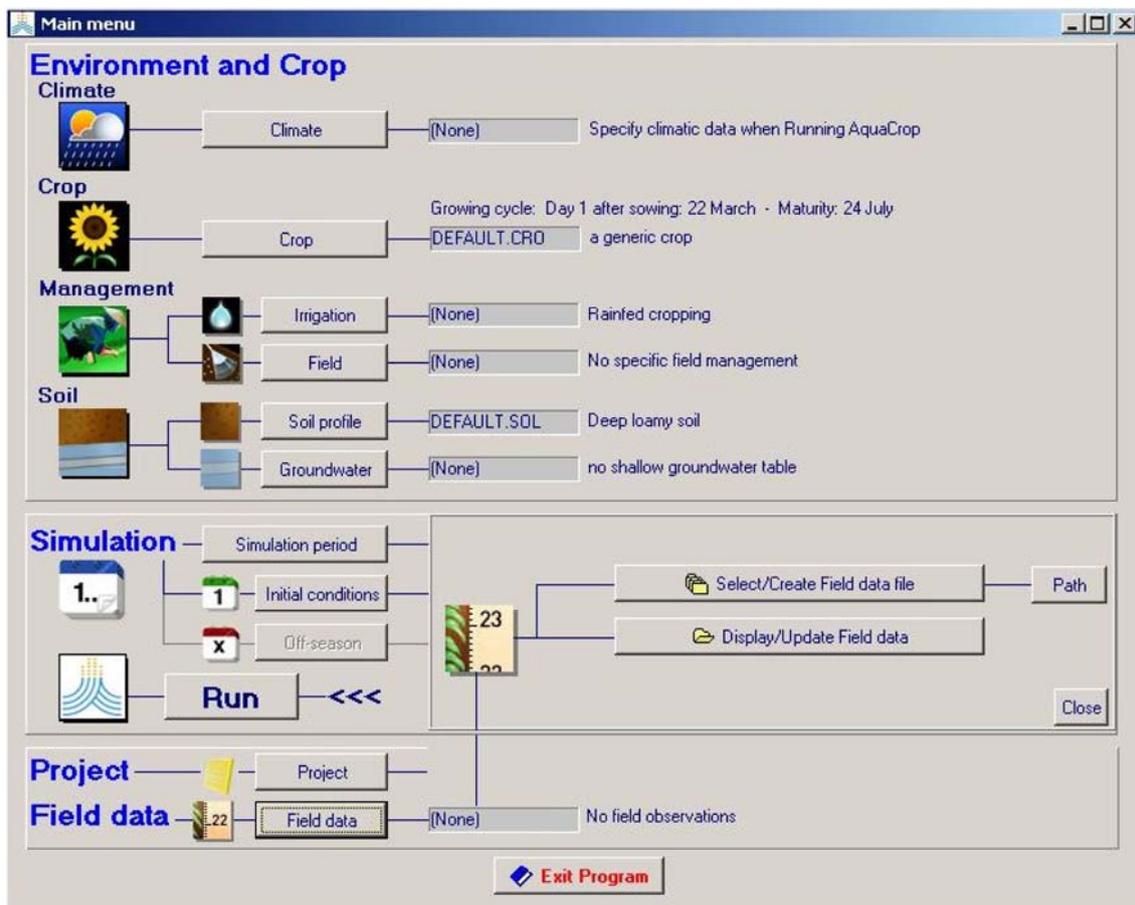


Figure 2.19a - Les commandes **<Sélectionner/Créer un fichier Données de terrain>** (*select/create field data file*) et **<Affichage/Mise à jours des données de terrain>** (*display/update field data*) du **Menu principal**

2.19.2 Spécification des données de terrain

Dans le menu *Données de terrain (field data)*, l'utilisateur précise les données de terrain observées qui peuvent consister, en la couverture de la canopée verte observée (CC), la biomasse sèche au-dessus du sol (B) et/ou la teneur en eau du sol (SWC) collectées pendant un nombre précis de jours (Fig. 2.19b). La valeur moyenne et son écart standard peuvent être spécifiés si plusieurs observations ont été faites pendant l'échantillonnage d'un jour précis. La teneur en eau du sol est la teneur en eau totale dans une zone bien définie (ex: la zone des racines). Par conséquent, la profondeur du sol, pour lequel les teneurs en eau avaient été calculées doit être précisée.

The screenshot shows the 'Field data' window with a 'Description' tab selected. It features an 'Add' button with a dropdown set to '1 measurements'. Below this is a 'First day of measurements' section with a checkbox 'Not linked to a specific year', a date selector set to '22 March 2007', and a 'Close' button. To the right, a 'for soil depth' field is set to '1.00 m'. The main area contains a table with columns for 'When?', 'Green Canopy Cover (CC) [%]', 'dry above-ground Biomass (B) [ton/ha]', and 'Soil water content (SWC) [mm water]'. Each of these measurement columns is further divided into 'mean' and 'st dev' sub-columns. A calendar icon is visible on the left side of the table.

Nr	Date	day number	Green Canopy Cover (CC) [%]		dry above-ground Biomass (B) [ton/ha]		Soil water content (SWC) [mm water]	
			mean	st dev	mean	st dev	mean	st dev
1	1 April 2007	11	5.0	3.0			300.0	20.0
2	20 April 2007	30	30.0	5.0	1.000	0.300		
3	30 April 2007	40	50.0				250.0	25.0
4	10 May 2007	50	60.0	5.0				
5	1 June 2007	72			4.000	0.200	150.0	30.0
6	19 June 2007	90			4.400	0.300		
7	9 July 2007	110	45.0	6.0	5.000	0.500	100.0	10.0
8	19 July 2007	120			5.500	0.500	100.0	10.0

At the bottom of the window, there are buttons for 'Cancel', 'Main Menu', and 'Save as', along with a 'Clear measurements' button.

Figure 2.19b - Spécification des observations et leurs jours dans le menu *Données de terrain (field data)*

2.20 Simulation

2.20.1 Présentation des résultats de simulation

Les résultats de simulation sont inscrits dans le menu *Simulation* (*simulation run*) dans des graphiques qui sont mis à jour à la fin de chaque pas journalier (Fig. 2.20a, b, c, d et e). Pour chaque parcelle, l'utilisateur peut suivre à travers la simulation, les effets de stress (hydrique, de température, de fertilité et de salinité) sur le développement et la production de la culture, et basculer vers plusieurs affichages, chacun des différents séries de données de sorties, présentées dans différents dossiers. La capacité de simuler avec des pas de temps courts et de basculer entre plusieurs dossiers est particulièrement utile si l'on veut étudier l'effet d'un évènement donné sur un paramètre spécifique.

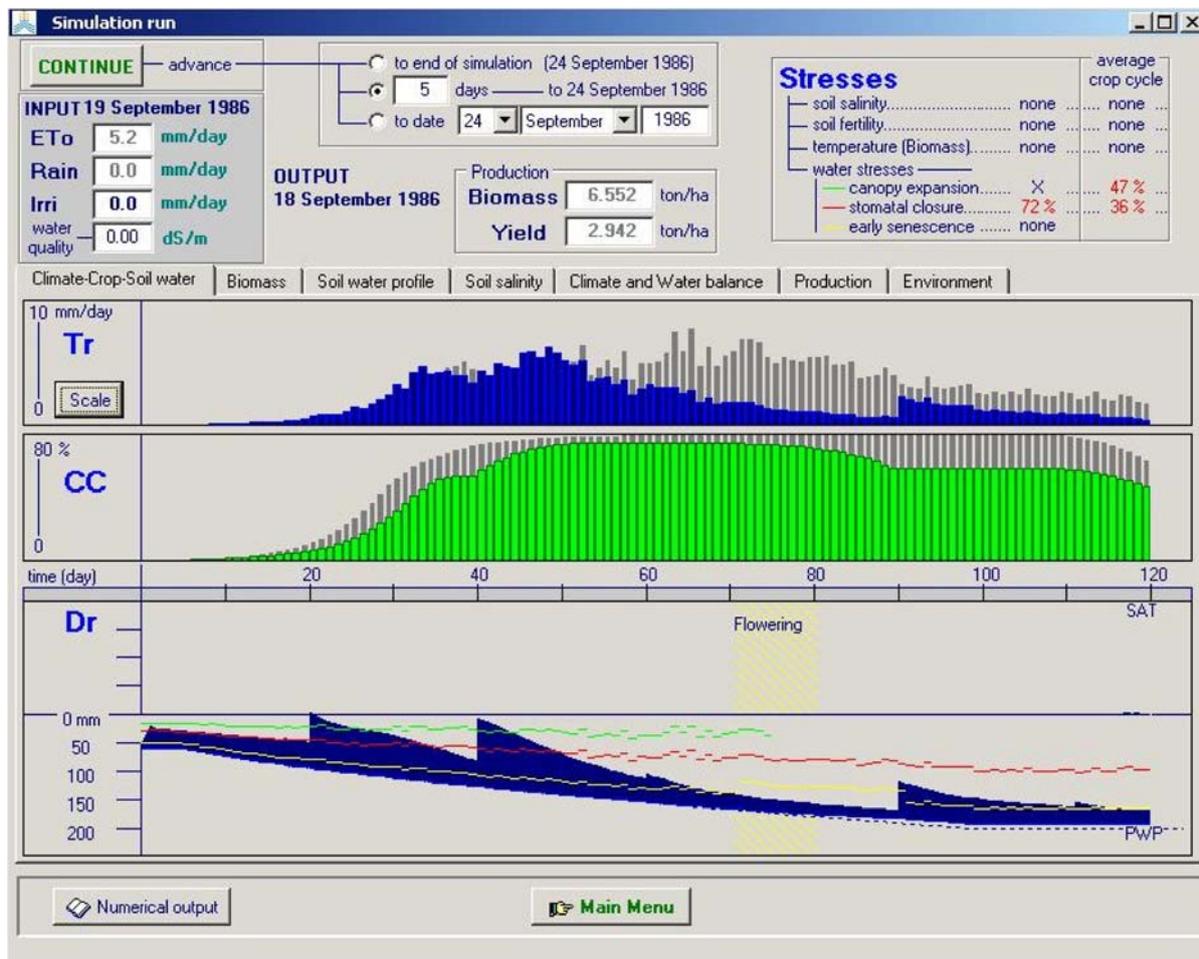


Figure 2.20a - Affichages graphiques des données d'entrée Climat-Culture-Eau du sol du menu *Simulation*

- **L'onglet climat-culture-eau du sol**

L'onglet '*Climat-Culture-Eau du sol*' (*climate-crop-soil*) (Fig. 2.20a) contient des graphiques avec des tracées en fonction du temps (i) de l'épuisement de la réserve en eau dans la zone racinaire (Dr), (ii) du développement de la couverture de la canopée verte (CC), et (iii) de la transpiration (Tr).

L'absence de pluies et d'irrigation pendant de longues périodes pourraient diminuer la teneur en eau de la zone racinaire jusqu'en dessous du seuil (ligne verte) affectant l'expansion de la canopée. Cela pourrait résulter en un développement plus lent que prévu de la canopée. Dans le graphique de la couverture de la canopée (CC), la couverture de la canopée sans stress hydrique est indiquée en gris clair, en arrière-plan comme référence. Un stress hydrique plus sévère entraînera une fermeture des stomates (ligne rouge), résultant en une réduction de la transpiration de la culture. Dans le graphique de la transpiration (Tr), la transpiration maximale de la culture qui peut être atteinte lorsque la culture est bien arrosée est indiquée en gris clair en arrière-plan comme référence. Un stress hydrique sévère pourrait provoquer même une sénescence précoce de la canopée lorsque l'épuisement de la réserve en eau dans la zone racinaire excède le seuil de sénescence (ligne jaune).

- **Page avec le paramètre sélectionné**

Sur le second onglet du menu *Simulation*, l'utilisateur peut choisir des paramètres spécifiques pour des analyses approfondies (Tab. 2.20a). Plusieurs paramètres de culture, et des bilans d'eau et de salinité du sol peuvent être sélectionnés, et l'échelle du graphique peut être ajustée (Fig. 2.20b).

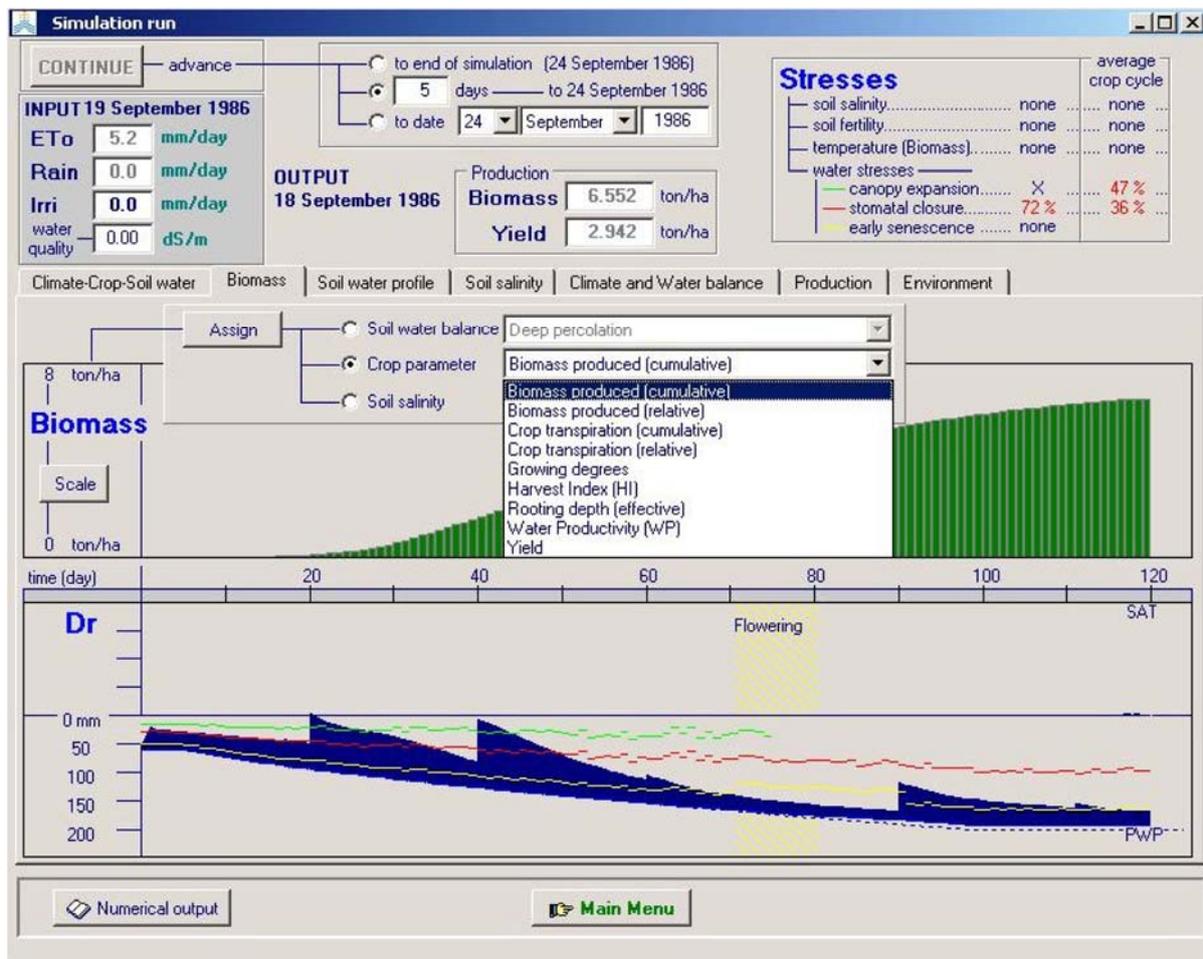


Figure 2.20b - Sélection d'un paramètre pour affichage dans le menu *Simulation*

Tableau 2.20a - Paramètres du bilan d'eau du sol, de culture et de salinité du sol qui peuvent être sélectionnés pour présentation dans le menu *Simulation*

Symbole	Description	Unités
Paramètres du bilan d'eau du sol		
Drainage	Percolation profonde	mm
Somme (drainage)	Percolation profonde (cumulée)	mm
ET	Evapotranspiration	mm
Somme (ET)	Evapotranspiration (cumulée)	mm
ETx	Evapotranspiration (maximum)	mm
ET/ETx	Evapotranspiration (relative)	%
Inf	Eau infiltrée	mm
Somme (Inf)	Eau infiltrée (cumulée)	mm
Irri	Irrigation	mm
Somme (Irri)	Irrigation (cumulée)	mm
Pluie	Pluviométrie	mm
Somme (Pluie)	Pluviométrie (cumulée)	mm
Evap	Evaporation du sol	mm
Somme (E)	Evaporation du sol (cumulée)	mm
Ex	Evaporation du sol (maximum)	mm
E/Ex	Evaporation du sol (relative)	%
Ruissellement	Ruissellement	mm
Somme (Ruissellem.)	Ruissellement (cumulé)	mm
Paramètres de culture		
Biomasse	Biomasse produite (cumulée)	tonne/ha
B (rel)	Biomasse produite (relative)	%
Somme (Tr)	Transpiration de la plante (cumulée)	mm
Tr/Trx	Transpiration de la plante (relative)	%
GDD	Degrés de croissance	°C-jour
HI	Indice de récolte (HI)	%
Z	Profondeur efficace des racines	m
WP	Productivité de l'eau	g/m ²
Production	Production	tonne/ha
Paramètres de salinité du sol		
SelIn	Sel infiltré dans le profil	tonne/ha
Somme (Sin)	Sel infiltré dans le profil (cumulé)	tonne/ha
SelOut	Sel drainé en dehors du profil	tonne/ha
Somme (Sout)	Sel drainé en dehors du profil (cumulé)	tonne/ha
SelUp	Sel remonté à partir de la nappe phréatique	tonne/ha
Somme (Sup)	Sel remonté (cumulé)	tonne/ha
SelTot	Sel accumulé dans le profil	tonne/ha
SelZ	Sel accumulé dans la zone racinaire	tonne/ha
ECe	EC de l'extrait de pâte de sol de la zone racinaire	dS/m
ECsw	EC de l'eau du sol dans la zone racinaire	dS/m
ECgw	EC de la nappe phréatique	dS/m

- Onglet **profil d'eau du sol**

Dans l'onglet '*profil d'eau du sol*' (*soil water profile*) du menu **Simulation**, la teneur en eau simulée dans les différents compartiments du profil de sol, est ajustée pour chaque jour de la période de simulation.

- Onglet **salinité du sol**

Dans l'onglet '*salinité du sol*' (*soil salinity*) du menu **Simulation**, le profil de salinité du sol simulé et les paramètres du bilan de sel du profil de sol et de la zone racinaire, sont ajustés pour chaque jour de la période de simulation (Fig. 2.20c).

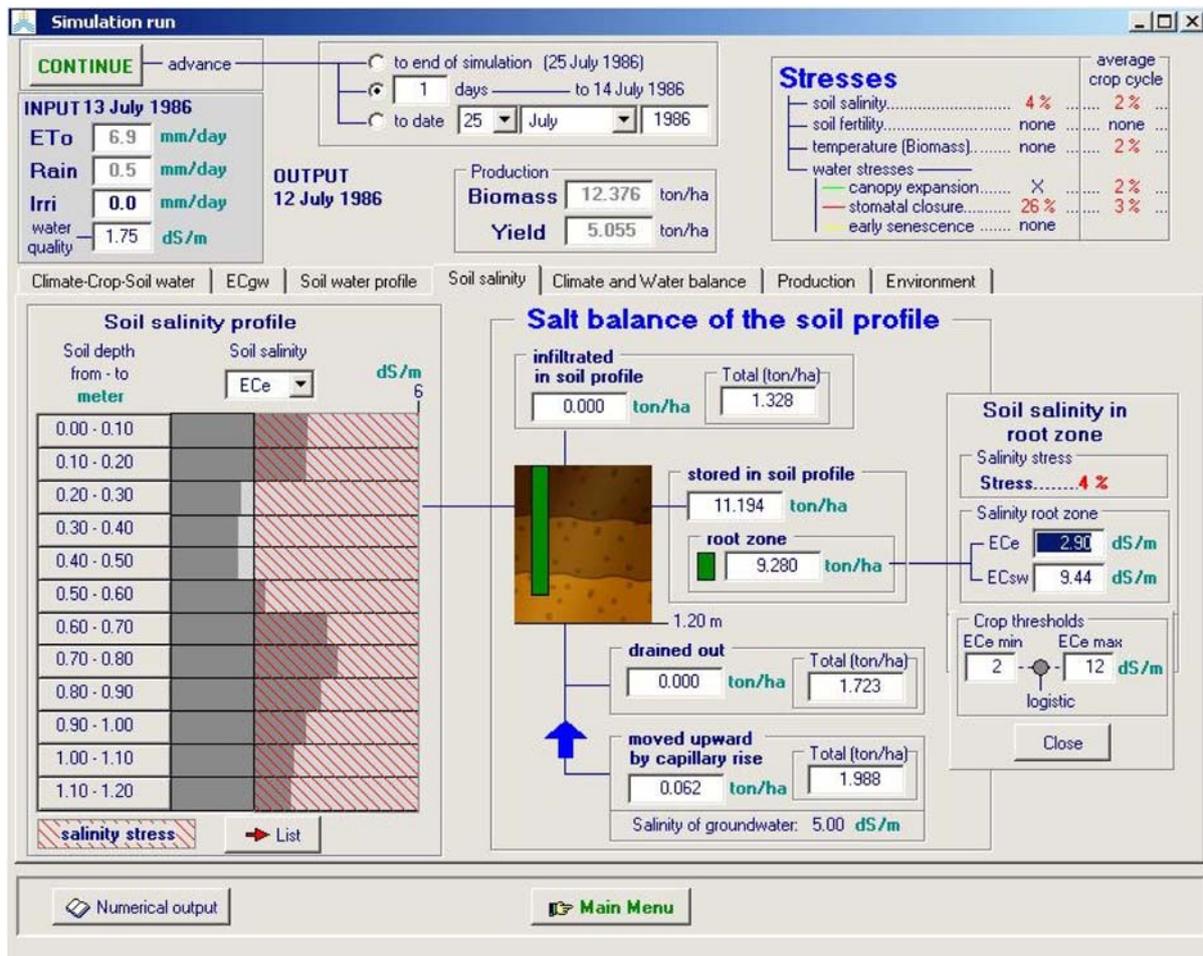


Figure 2.20c - Présentation du profil de salinité du sol et le bilan du sel (*salt balance of the soil profile*) dans le Menu **Simulation**

- Onglet Climat et Bilan d'eau

Dans l'onglet 'climat et bilan d'eau' (*climate and water balance*) du menu *Simulation*, des valeurs sont données pour l'évaporation du sol, la transpiration d'une culture, le ruissellement, l'infiltration de l'eau, le drainage et la remontée capillaire. Les évènements irrigations sont présentés dans le menu *Irrigation* (Fig. 2.20d).

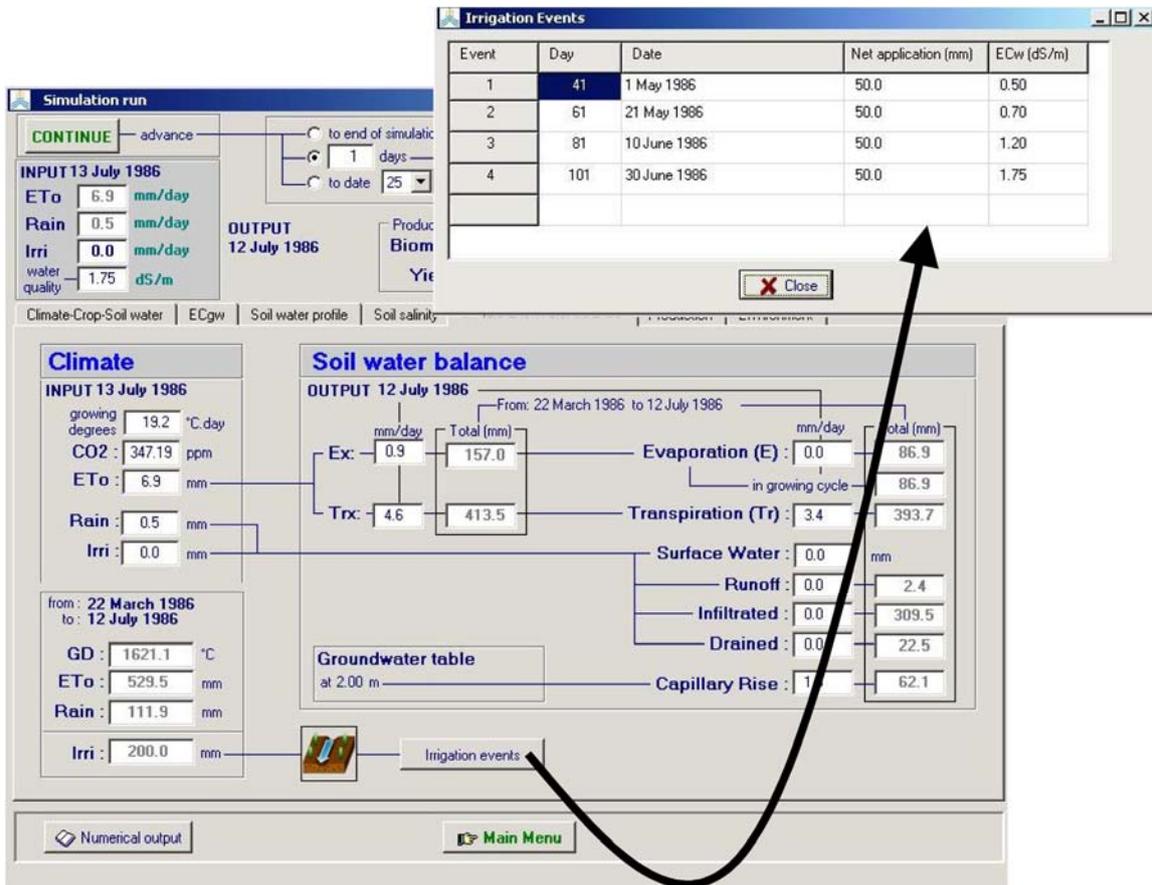


Figure 2.20.d - Présentation des paramètres du Climat et du Bilan d'eau (*climate and soil water balance*) dans le menu *Simulation* et des évènements d'irrigations dans le menu *Irrigation*

- **Onglet Production**

Dans l'onglet 'production' du menu *Simulation*, les informations sont données sur l'impact anthère et post-anthère du stress hydrique sur l'ajustement de HI (Fig. 2.20e). La quantité de biomasse simulée et la biomasse qui aurait pu être produite en l'absence de stress hydrique, de stress de fertilité et de salinité du sol sont aussi affichées. L'information sur la productivité de l'eau ET (rendement par unité d'eau évapotranspirée) est aussi donnée.

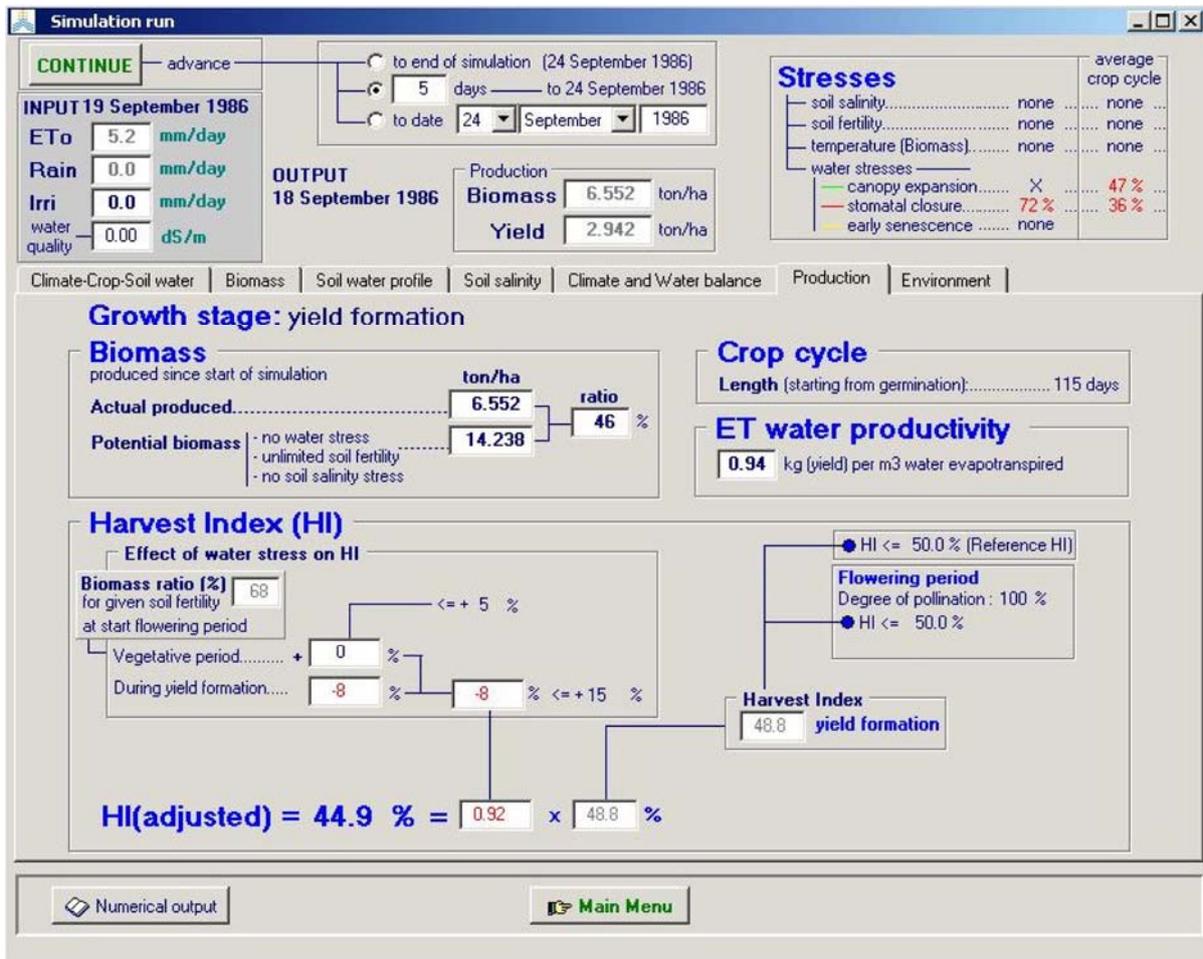


Figure 2.20e - Information sur la production de biomasse, la productivité de l'eau ET, et l'impact anthère- et post-anthère du stress hydrique sur l'ajustement de HI dans le menu *Simulation*

- Onglet synthèse de simulation

Dans l'onglet 'synthèse de simulation' du menu *Simulation*, les informations concernant les totaux d'un nombre de paramètres sélectionnés (Tab. 2.20b) sont données à la fin de chaque simulation (Fig. 2.20f).

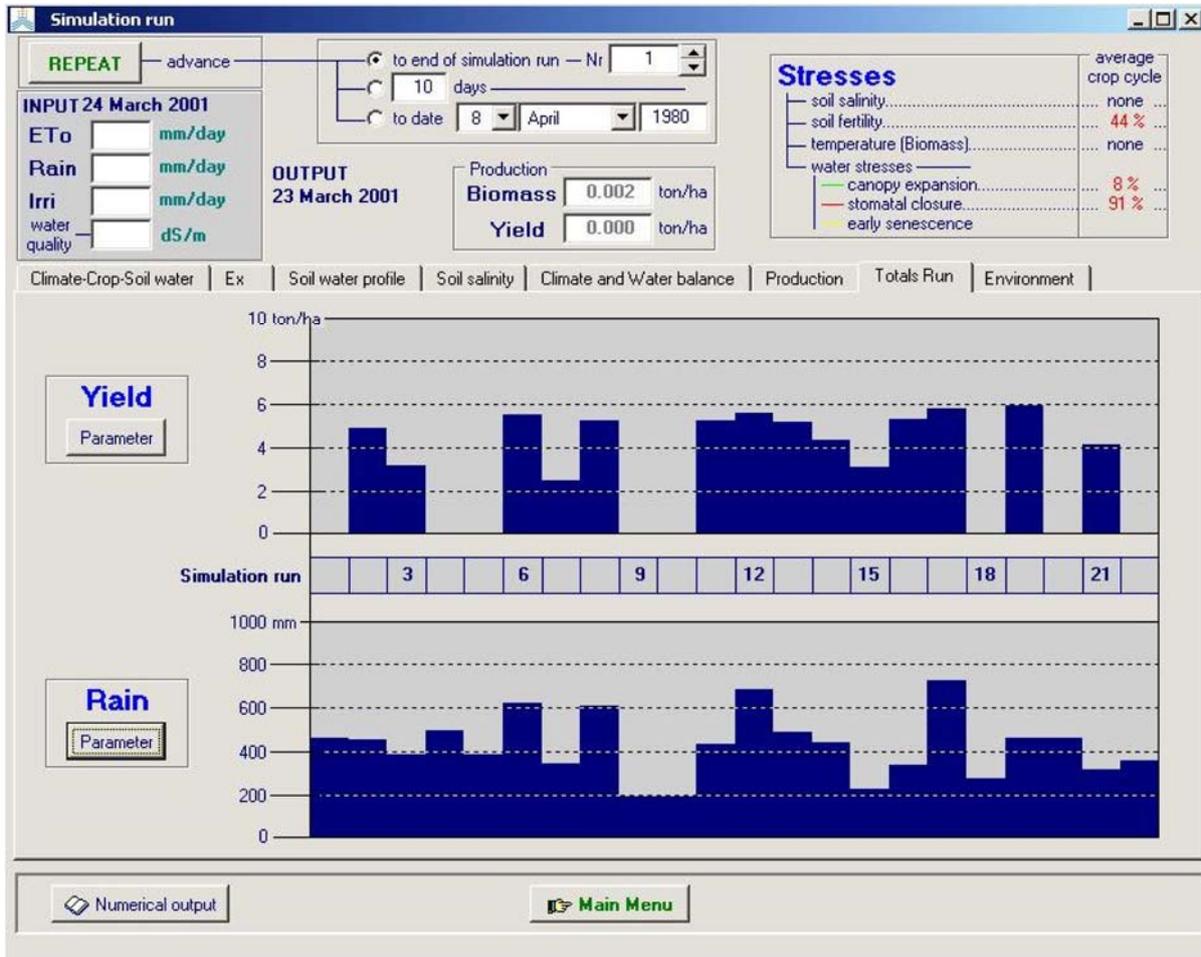


Figure 2.20f - Les informations sur le rendement simulé et pluviométrie totale (pendant la période de simulation) pour les années successives d'un projet à simulations multiples dans le menu *Simulation*

Tableau 2.20b - Paramètres qui peuvent être sélectionnés pour présentation dans le menu *Simulation*

Symbole	Description	Unités
Pluie	Pluviométrie	mm
ETo	ETo	mm
GD	GD	°C
CO2	CO2	ppm
Irri	Irrigation	mm
Inf	Eau infiltrée	mm
RO	Ruissellement	mm
Drainage	Percolation profonde	mm
CR	Remontée capillaire	mm
Evap	Evaporation du sol	mm
E/Ex	Evaporation du sol (relative)	%
Tr	Transpiration d'une culture	mm
Tr/Trx	Transpiration d'une culture (relative)	%
SelIN	Sel infiltré dans le profil de sol	tonne/ha
SelOUT	Sel drainé hors du profil de sol	tonne/ha
SelUP	Sel remonté par capillarité	tonne/ha
SelProf	Sel accumulé dans le sol	tonne/ha
Ccycle	Durée du cycle des plantes	jour
SelStr	Stress moyen de salinité	%
FertStr	Stress moyen de fertilité du sol	%
TempStr	Stress moyen de température (biomasse)	%
ExpStr	Stress moyen d'expansion des feuilles	%
StStr	Stress moyens des stomates	%
Biomasse	Biomasse	tonne/ha
Brelatif	Biomasse relative (réf : conditions optimales)	%
HI	Indice de récolte	-
Yield	Rendement	tonne/ha
WPet(Y)	productivité de l'eau ET (pour le rendement)	kg/m3

- Onglet Environnement de simulation.

Dans l'onglet 'environnement' de la simulation du menu *Simulation*, les fichiers de données d'entrée sélectionnés pour la simulation sont présentés, et les paramètres de configuration du programme peuvent être vérifiés (Fig. 2.20g).

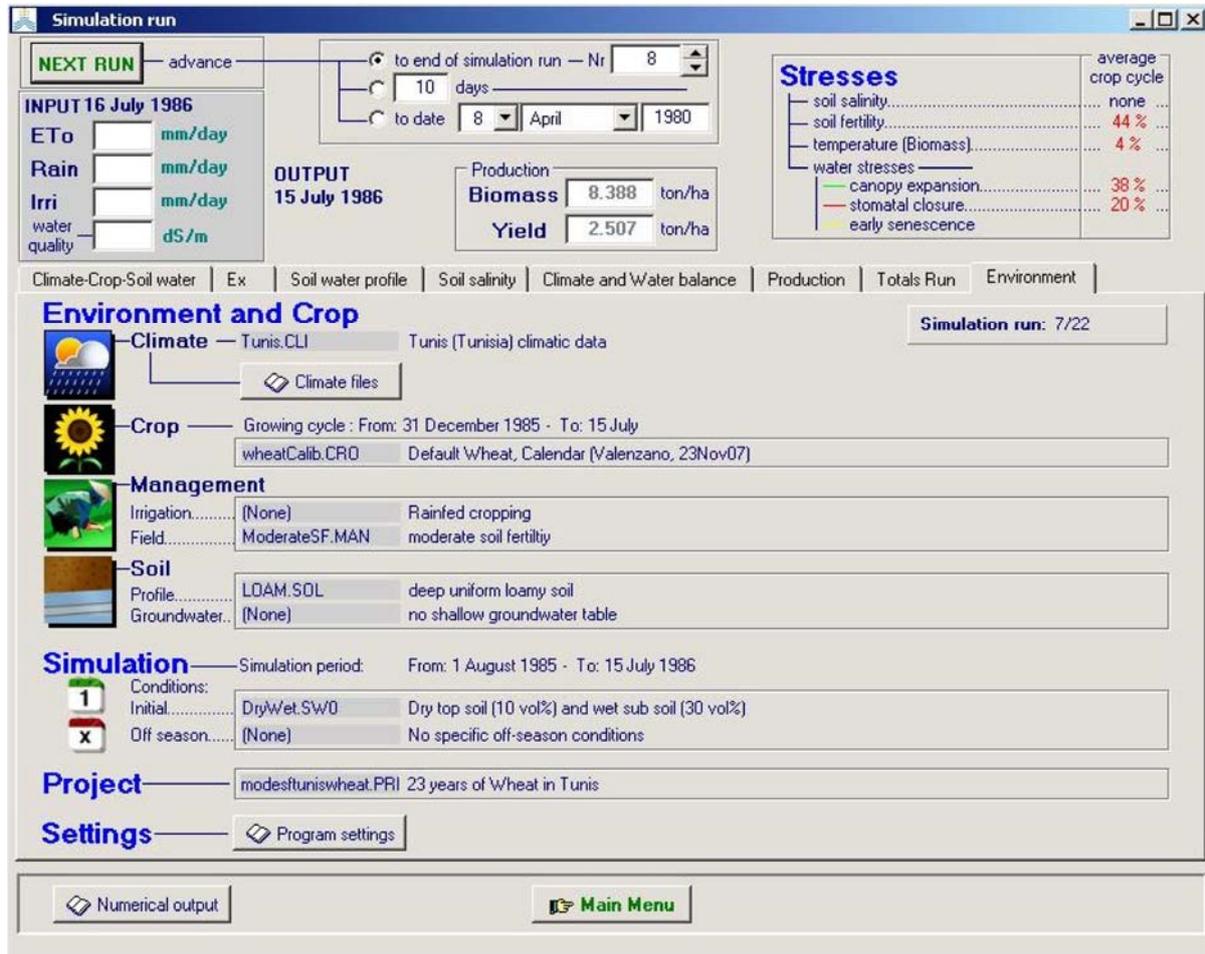


Figure 2.20g - Présentation des fichiers de données d'entrée sélectionnés dans le menu *Simulation*

2.20.2 Sortie numérique

Les résultats de simulation sont enregistrés dans des fichiers de sorties et les données peuvent être présentées en cliquant la commande **<Sortie numérique>** (*numerical output*) du menu **Simulation** (Fig. 2.20h). Les données peuvent être regroupées en des données décadaires, mensuelles ou annuelles.

The screenshot shows a software window titled "Numerical output" with a sub-header "Daily" and "Crop development and production". On the left, there are radio buttons for "Time" (Day, 10-day, Month, Year) and "Aggregate" (Day, 10-day, Month, Year). On the right, a "Select Output File" section has radio buttons for "Crop development and production", "Profile/Root zone" (with a dropdown menu showing "soil water content"), "Soil water balance", "Compartments" (with a dropdown menu showing "soil water content"), and "Net irrigation requirements". A "Legend" button is also present. The main area contains a table with 12 columns: Day, Month, Year, DAP, Stage, GD, Z, StExp, StSto, StSen, StSalt, and CC. The table data is as follows:

Day	Month	Year	DAP	Stage	GD	Z	StExp	StSto	StSen	StSalt	CC
					°C	m	%	%	%	%	%
27	6	1986	37	2	18.6	0.61	62	9	0	0	53.0
28	6	1986	38	2	20.0	0.62	83	15	0	0	53.4
29	6	1986	39	2	18.2	0.62	100	23	0	0	53.4
30	6	1986	40	2	19.8	0.63	100	25	0	0	53.4
1	7	1986	41	2	20.5	0.64	0	0	0	0	57.1
2	7	1986	42	2	18.9	0.64	0	0	0	0	60.3
3	7	1986	43	2	18.8	0.65	0	0	0	0	63.0
4	7	1986	44	2	21.0	0.66	0	0	0	0	65.3
5	7	1986	45	2	20.9	0.67	0	0	0	0	67.4
6	7	1986	46	2	19.4	0.67	4	0	0	0	69.0

At the bottom of the window, there is a "Scroll" section with "up" and "down" arrows, and an "OK" button with a green checkmark.

Figure 2.20h - Présentation des données enregistrées dans les fichiers de sorties

2.20.3 Evaluation des résultats de simulation

Pendant une simulation, les utilisateurs peuvent évaluer les résultats de simulation à l'aide des données de terrain stockées dans un fichier d'observation (voir 2.19 Données de terrain). L'utilisateur a accès au menu *Evaluation des résultats simulés* (*evaluation of simulation results*) en cliquant sur la commande <Données de terrain> (*observations*) dans le menu *Simulation* (Fig. 2.20i).

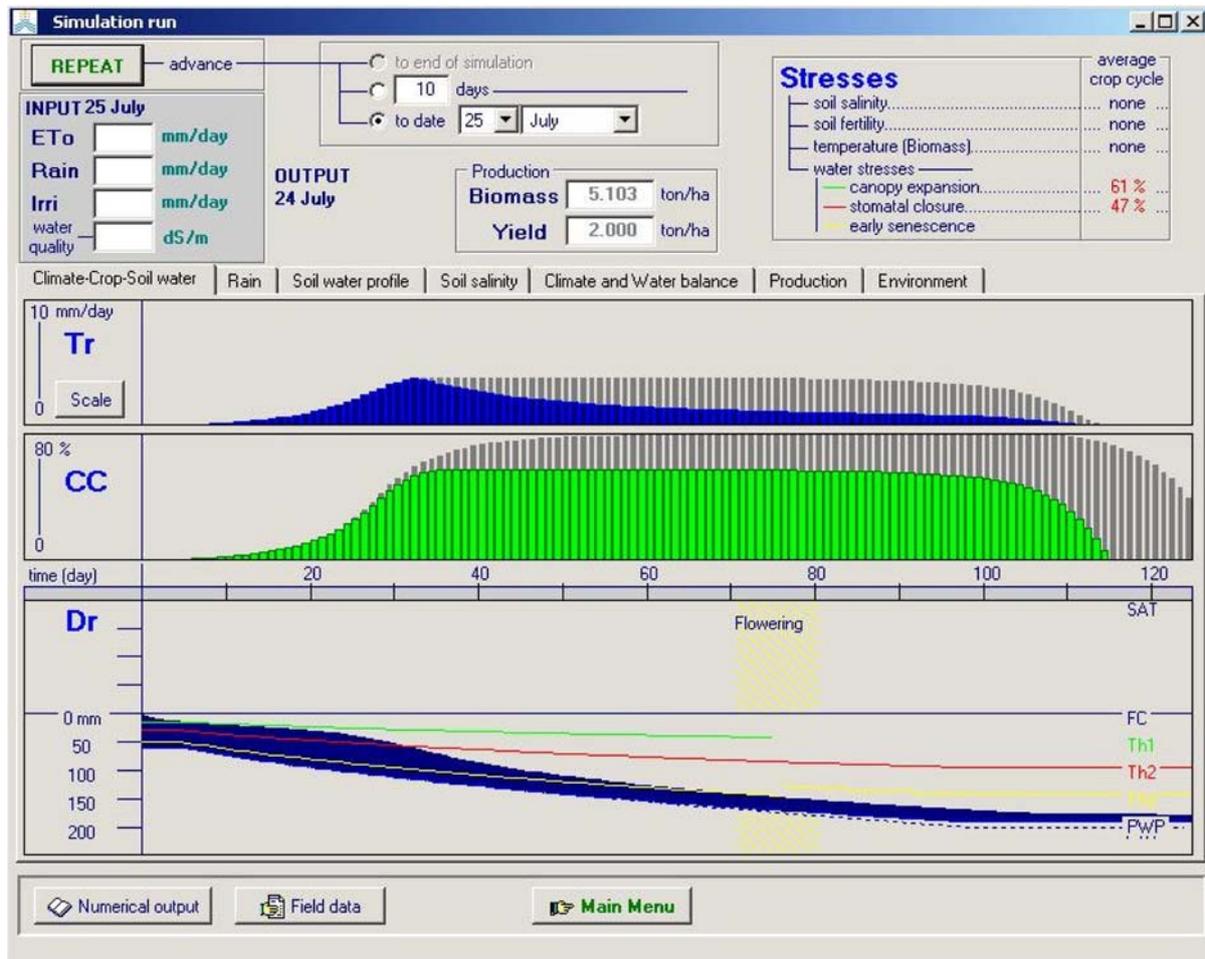


Figure 2.20i - Menu *Simulation* avec la commande <Données de terrain> (*observations*) dans la fenêtre de commande

- **Affichage graphique et numérique**

Pour chacun des trois séries d'observations de terrain (couverture de la canopée, biomasse et teneur en eau du sol) l'utilisateur trouve dans le menu *Evaluation des résultats simulés* (*evaluation of simulation results*) :

1. Un graphique où les valeurs simulées et observées (avec leurs déviations standard) sont tracées (Fig. 2.20j) ;
2. Un affichage numérique où les valeurs simulées et observées (avec leurs déviations standard) sont affichées ; et
3. Des indicateurs statistiques évaluant les résultats de simulation (Fig. 2.20k).

Les évaluations peuvent être enregistrées sur un disque pour une utilisation ultérieure.

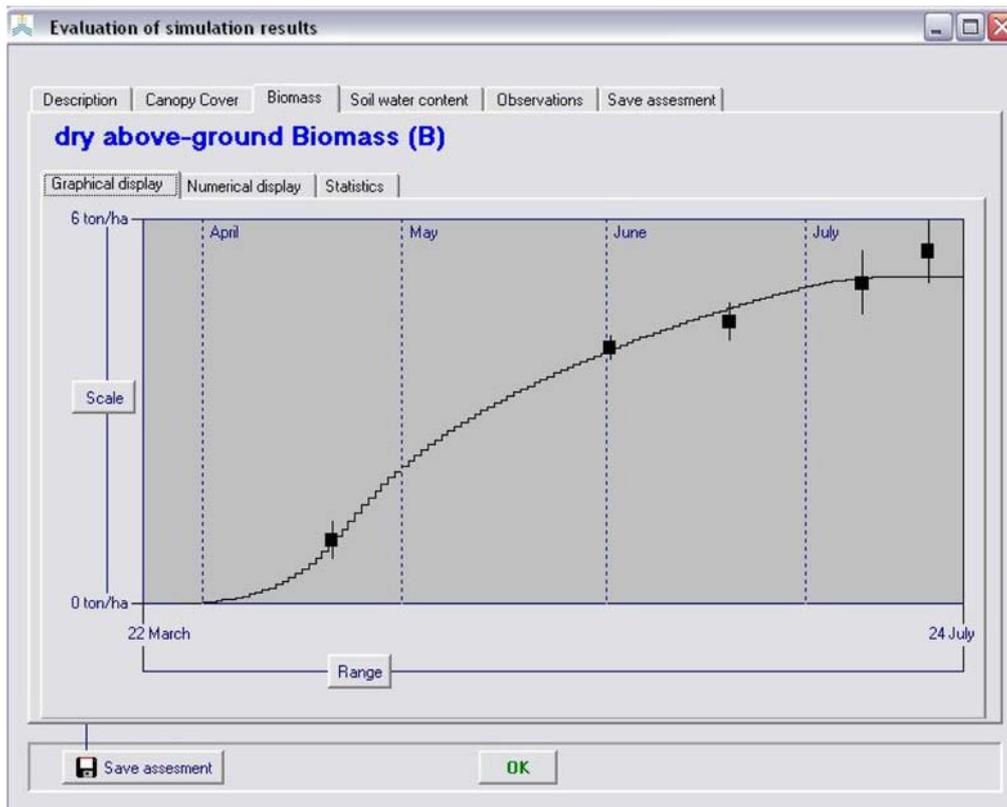


Figure 2.20j - Biomasse sèche au-dessus-sol, simulée (ligne) et observée (points) avec leur déviations standard (lignes verticales) dans le menu *Evaluation des résultats simulés* (*evaluation of simulation results*)

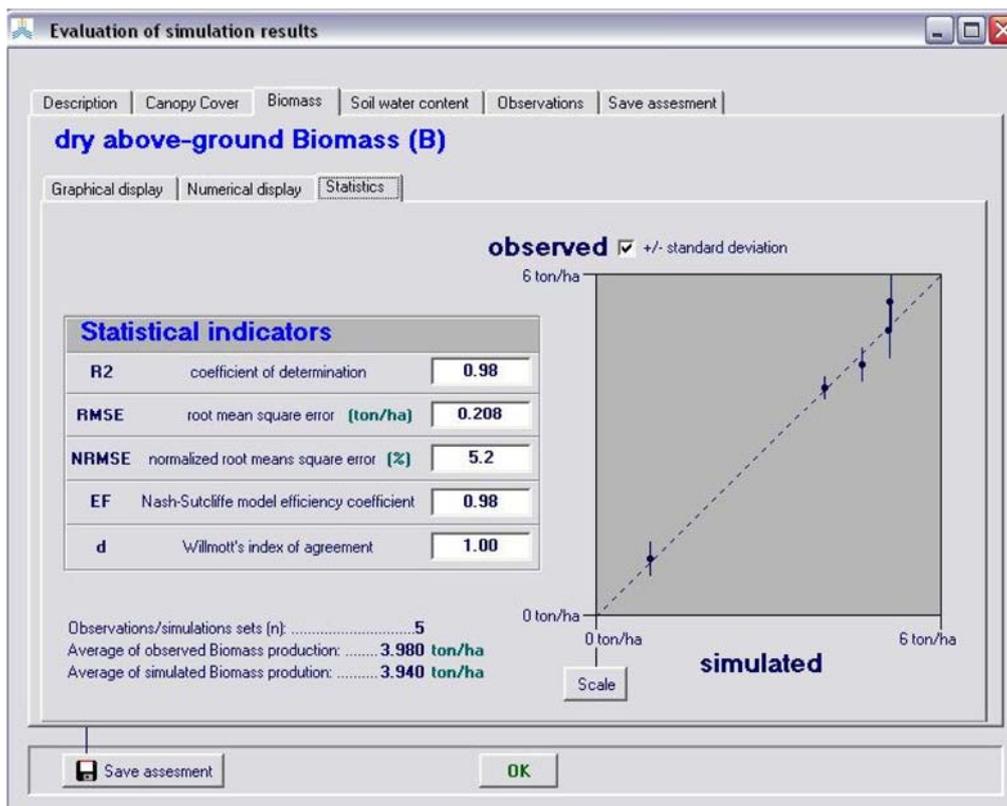


Figure 2.20k - Indicateurs statistiques pour l'évaluation de la biomasse sèche au-dessus-sol simulée, dans le menu *Evaluation des résultats simulés*

- **Indicateurs statistiques**

L'évaluation de performance d'un modèle est importante pour apporter une estimation quantitative de la capacité du modèle à reproduire une variable observée, pour évaluer l'impact du calibrage des paramètres du modèle et comparer les résultats du modèle avec des cas précédents (Krause et al., 2005). Plusieurs indicateurs statistiques sont disponibles pour évaluer la performance du modèle (Loague and Green, 1991). Chacun ayant ses forces et ses faiblesses, c'est à dire que l'utilisation d'un ensemble d'indicateurs différents est nécessaire pour évaluer efficacement la performance du modèle (Willmott, 1984; Legates and McCabe, 1999). Dans les équations 8.4a à 8.4e, O_i et P_i sont respectivement des observations et des prédictions, \bar{O} et \bar{P} leurs moyennes et n le nombre d'observations.

Coefficient de détermination (r^2)

Le coefficient de détermination r^2 est défini comme la valeur carrée du coefficient de corrélation de Pearson. r^2 représente la proportion de variance dans les données mesurées expliquée par le modèle, ou peut aussi être interprété comme le ratio carré entre la covariance multiplié par l'écart-type des observations et des prédictions. Cela va de 0 à 1, avec les valeurs proches de 1 indiquant un bon accord, et typiquement, des valeurs plus grandes que 0.5 sont considérées acceptables dans les simulations hydrauliques (Moriassi et al., 2007).

$$r^2 = \left[\frac{\sum (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum (O_i - \bar{O})^2 \sum (P_i - \bar{P})^2}} \right]^2 \quad (8.4a)$$

Une conséquence majeure de r^2 est que seule la dispersion est quantifiée, ce qui signifie que le modèle qui surestime systématiquement (ou sous-estime) les observations, peut encore avoir une bonne valeur r^2 (Krause et al., 2005). Willmott (1982) a aussi énoncé que dans le contexte des sciences atmosphériques, r et r^2 sont insuffisants et souvent trompeuses lorsqu'elles sont utilisées pour évaluer la performance d'un modèle. L'analyse de l'erreur résiduelle (la différence entre les prédictions et observations du modèle : $P_i - O_i$) est supposée contenir plus d'informations appropriées et perspicaces.

Racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE)

La racine carrée de l'erreur quadratique Moyenne ou RMSE est l'un des indicateurs statistiques les plus largement utilisés (Jacovides and Kontoyiannis, 1995) et mesure l'amplitude moyenne de la différence entre les prédictions et les observations. Il va de 0 à l'infini, avec le premier (0) indiquant une bonne performance et le dernier un modèle pauvre. Un grand avantage de RMSE est qu'il résume la différence moyenne dans les unités de P et O . Elle ne fait cependant pas de différence entre sur et sous-estimation.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (P_i - \bar{O})^2}{n}} \quad (8.4b)$$

Un des désavantages de RMSE est que les erreurs résiduelles sont calculées comme des valeurs carrées, ce qui résulte en ce que les valeurs supérieures dans une série de temps ont plus de poids comparées aux valeurs inférieures (Legates and McCabe, 1999) et que le RMSE est particulièrement sensible aux valeurs extrêmes (Moriassi et al., 2007). Ceci est une faiblesse de

tous les indicateurs statistiques où la variance résiduelle est carrée, y compris celles de EF et Willmott qui sont discutées plus bas.

Racine Carrée de l'Erreur quadratique Moyenne normalisée (NRMSE)

Parce que la RMSE est exprimée dans les unités des variables étudiées, elle ne permet pas de tester le modèle sous une large gamme de conditions météo-climatiques (Jacovides and Kontoyiannis, 1995). Cependant, la RMSE peut être normalisée en utilisant la moyenne de la variable observée (\bar{O}). La RMSE normalisée (NRMSE) est exprimée en pourcentage et donne une indication de la différence relative entre le modèle et les observations.

$$nRMSE = \frac{1}{\bar{O}} \sqrt{\frac{\sum (P_i - \bar{O})^2}{n}} 100 \quad (8.4c)$$

Une simulation peut être considérée excellente si la NRMSE est inférieure à 10%, bonne si elle est entre 10 et 20%, acceptable entre 20 et 30% et pauvre lorsqu'elle est supérieure à 30%.

Modèle du coefficient d'efficacité de Nash-Sutcliffe (EF)

Le modèle du coefficient d'efficacité de Nash-Sutcliffe (EF) détermine l'amplitude relative de la variance résiduelle comparée à la variance des observations (Nash and Sutcliffe, 1970). Une autre manière de voir cela est de dire que EF indique comment la graphique des données observées contre celles simulées convient à la ligne 1:1 (Moriassi et al., 2007). EF peut aller de l'infini à 1. Un EF de 1 indique un parfait accord entre le modèle et les observations, un EF de 0 signifie que les prédictions du modèle sont aussi précises que la moyenne des données observées et un EF négatif se produit lorsque la moyenne des observations est une prédiction meilleure que le modèle.

$$EF = 1 - \frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (O_i - \bar{O})^2} \quad (8.4d)$$

EF est très fréquemment utilisé, ce qui signifie qu'il y'a un grand nombre de valeurs reportées disponible dans la littérature (Moriassi et al, 2007). Cependant, tout comme r^2 , EF n'est pas très sensible à des sur- ou sous-estimations systématiques par le modèle (Krause et al., 2005).

Indice d'accord de Willmott (d)

L'indice d'accord a été proposé par Willmott (1982) pour mesurer le degré auquel les données observées sont approchées par les données prédites. Cela représente le ratio entre l'erreur quadratique moyenne et 'l'erreur potentielle', qui est définie comme la somme des carrés des valeurs absolues des distances entre les valeurs prédites et la moyenne observée, et des distances entre les valeurs observées et la moyenne observée (Willmott, 1984). Il surpasse l'insensibilité de r^2 et EF aux surestimations ou sous-estimations systématiques par le modèle (Legates and McCabe, 1999; Willmott, 1984). Il va de 0 à 1, avec 0 indiquant aucun accord et 1 indiquant un parfait accord entre les données prédites et les données observées.

$$d = 1 - \frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (8.4e)$$

Un des désavantages de d est que des valeurs relativement élevées peuvent être obtenues (au-delà de 0.65) même lorsque le modèle est faiblement performant, et qu'en dépit des intentions de Willmott (1982) d n'est toujours pas très sensible aux sur- ou sous-estimations systématiques (Krause et al., 2005).

Références

- Jacovides, C.P. and Kontoyiannis, H., 1995. Statistical procedures for the evaluation of evapotranspiration computing models. *Agricultural Water Management*, 27, 365-371.
- Krause, P., Boyle, D.P., Båse, F., 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*, 89-97.
- Legates, D.R. and McCabe, G.J., 1999. Evaluating the use of 'goodness-of-fit' measures in hydrologic and hydroclimatic model evaluation. *Water Resources Research*, 35, 233-241.
- Loague, K. and Green, R.E., 1991. Statistical and graphical methods for evaluating solute transport models: overview and application. *Journal of Contaminant Hydrology*, 7, 51-73.
- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Liew, M.W.V., Bingner, R.L., Harmel, R.D., Veith, T.L., 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50, 885-900.
- Willmott, C.J., 1984. On the evaluation of model performance in physical geography. In *Spatial Statistics and Models*. Gaile, G.L., Willmott, C.J. (Eds). D. Reidel, Boston, 443-460.
- Willmott, C.J., 1982. Some comments on the evaluation performance. *Bulletin American Meteorological Society*, 63, 1309-1313.

2.20.4 Fichiers des données de sortie

En quittant le menu *Simulation*, une option est disponible pour enregistrer les données de sortie sur disque. Une distinction est faite entre les fichiers contenant les résultats journaliers et les résultats saisonniers. Les fichiers sont enregistrés par défaut dans le répertoire OUTF d'AquaCrop. En utilisant différents noms de fichiers (et même de répertoires), l'utilisateur peut éviter que les résultats de simulation soient écrasés à chaque simulation (Fig. 2.20l).

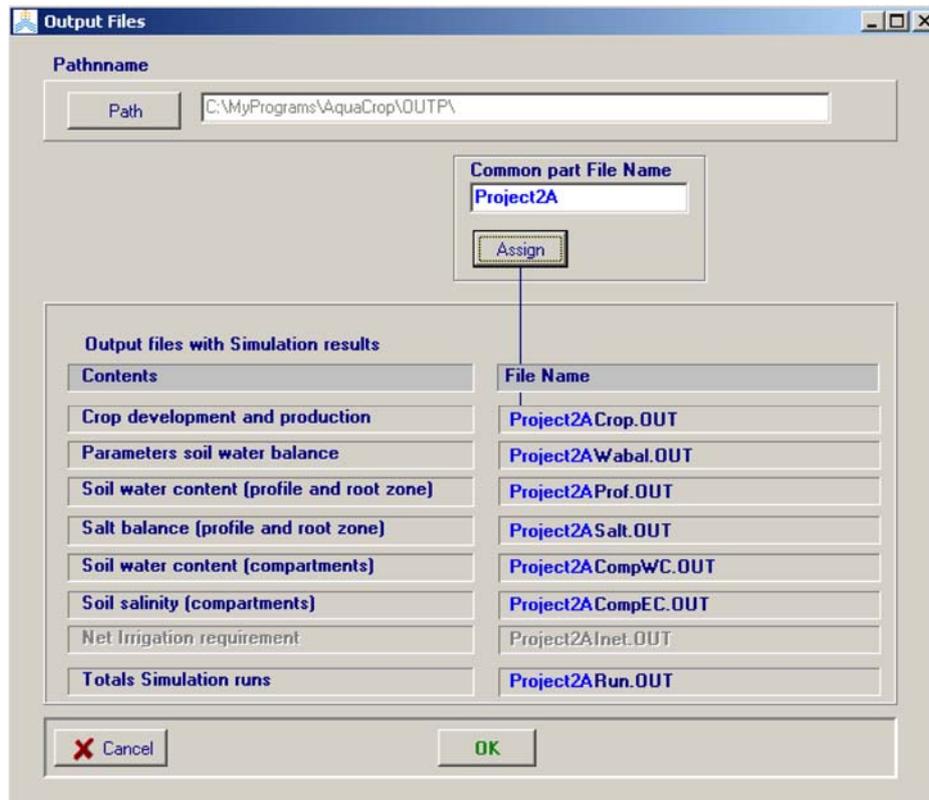


Figure 2.20l - Spécification de l'endroit et du nom du fichier pour les fichiers de sorties (*output files*)

- **Résultats journaliers**

Les données de sortie des résultats journaliers consistent en 7 fichiers contenant variables clés (Tab. 2.20c). Dans la section 2.23 (Fichiers de données sortie) la liste des variables clés est présentée.

- **Résultats saisonniers**

La sortie des résultats saisonniers peut aussi être enregistrée (RUN.OUT).

Les variables des fichiers de sorties sont présentés dans la section 2.23 (Fichier de données de sorties). Les données peuvent être ouvertes avec des tableurs pour analyses et traitements.

Tableau 2.20c - Nom du fichier par défaut et contenu des 7 fichiers de données de sortie avec les résultats journaliers de la simulation

Nom du fichier	Contenu
ProjectCrop.OUT	18 variables clés pour la croissance and production de la culture
ProjectWabal.OUT	17 variables clés pour la balance d'eau du sol
ProjectProf.OUT	10 variables clés pour la teneur en eau –Profil/Zone racinaire
ProjectSalt.OUT	10 variables clés pour la salinité du sol – Profil/Zone racinaire
ProjectCompWC.OUT	12 variables clés pour la teneur en eau – Compartiments
ProjectCompEC.OUT	12 variables clés pour la salinité du sol– Compartiments
ProjectInet.OUT	5 variables clés pour l'exigence nette d'irrigation

Données d'entrée/sortie et paramètres de configuration

En installant AquaCrop, le programme d'installation va (i) créer le dossier FAO, (ii) créer le dossier AQUACROP (lorsqu'il n'est pas encore disponible) dans le dossier FAO, et (iii) finalement installer le logiciel dans C:\FAO\AquaCrop.

```
C:\---- |-
      |-
      |-
      |-
      |-FAO---- |-
      |-          |-AQUACROP---- |- DATA
      |          AquaCrop.EXE      |
      |          Default.PAR        |-OUTP
      |          General. PAR       |
      |          Planting.PAR       |- OBS
      |          Onset.PAR          |
      |          Soil.PAR           |- SIMUL
      |          Rainfall.PAR
      |          Crop.PAR
      |          Field.PAR
      |          Temperature.PAR
      |          DEFAULT.CRO
      |          DEFAULT.SOL
      |          SOILS.DIR
```

Si AquaCrop est correctement installé, le dossier AquaCrop devrait contenir:

(i) les fichiers suivants:

- AquaCrop.EXE (le fichier exécutable);
- Fichiers avec les paramètres de projet par défaut (*.PAR);
- Fichiers avec les paramètres par défaut de culture et de sol: DEFAULT.CRO, DEFAULT.SOL;
- SOILS.DIR (un fichier avec les valeurs par défaut pour les caractéristiques du sol).

(ii) et quatre sous répertoires:

- DATA (sous répertoire par défaut pour les fichiers de données d'entrée);
- OUTP (sous répertoire par défaut pour les fichiers de données de sortie);
- OBS (sous répertoire par défaut pour les fichiers d'observations de terrain);
- SIMUL (sous répertoire servant aux simulations, contenant entre autres des fichiers comme celui de MaunaLoa.CO2).

2.21 Fichiers des données d'entrée

Les données d'entrée sont enregistrées dans des fichiers textes qui sont récupérés à travers l'interface utilisateur. Par défaut les fichiers des données d'entrée sont enregistrés dans le sous répertoire DATA du dossier AquaCrop. Une distinction est faite entre:

- Fichiers de climat (*.CLI) contiennent les noms d'une série de fichiers contenant :
 - o Données de température de l'air (*.TMP),
 - o Données d'évapotranspiration de référence (*.ETo)
 - o Données de pluviométrie (*.PLU), et
 - o Données atmosphériques CO₂ (*.CO2) ;
- Fichiers de culture (*.CRO) contenant les caractéristiques culturales ;
- Fichiers d'irrigation (*.IRR) contenant, en dehors de la méthode d'irrigation, (i) l'information pour le calcul du besoin net en irrigation, (ii) la durée, les quantités et la qualité de l'eau d'un calendrier d'irrigation, ou (iii) l'information pour générer les calendriers d'irrigation ;
- Fichiers de gestion de parcelle (*.Man) comprenant les caractéristiques de la parcelle sur laquelle la culture est cultivée ;
- Fichiers de profil de sol (*.SOL) contenant les caractéristiques de profil de sol ;
- Fichiers des eaux souterraines (*.GWT) contenant les caractéristiques de la nappe phréatique ;
- Fichiers avec les conditions spécifiques du profil de sol au début de la période de simulation (*.SW0) ;
- Fichiers avec les conditions de gestion hors-saisons (*.OFF); et
- Fichiers de simulation unique (*.PRO) contenant les informations sur la période de croissance et de simulation, les paramètres de configuration du programme, et les noms d'une série de fichiers de données d'entrée décrivant l'environnement, et les conditions initiales et hors-saison ;
- Fichiers de simulation multiples (*.PRM) contenant les informations sur les paramètres de configuration du programme et sur la période de croissance et de simulation, les noms d'une série de fichiers de données d'entrée décrivant l'environnement, et les conditions initiales et hors-saison pour chacune des simulations.

Des observations du terrain peuvent aussi être stockées dans des fichiers textes et sont récupérés à travers l'interface utilisateur pour l'évaluation des résultats de simulation. Par défaut, les fichiers sur les observations de terrain sont enregistrés dans le sous répertoire OBS du dossier AquaCrop.

- Fichiers avec les observations de terrain (*.OBS).

2.21.1 Fichier climat

Un fichier climat (*.CLI) (Tab. 2.21a, Fig. 2.21) contient à côté de sa description et la référence de la version de AquaCrop, les noms du fichier de température de l'air (*.TMP), du fichier d'ETo (*.ETo), du fichier de pluviométrie (*.PLU), et du fichier de CO₂ (*.CO2).

Tableau 2.21a - Exemple d'un fichier climat (fichiers avec l'extension CLI)

Tunis (Tunisie) données climatiques
 Version AquaCrop : 4.0 (Mai 2012)
 Tunis.TMP
 Tunis.ETo
 Tunis7902.PLU
 MaunaLoa.CO2

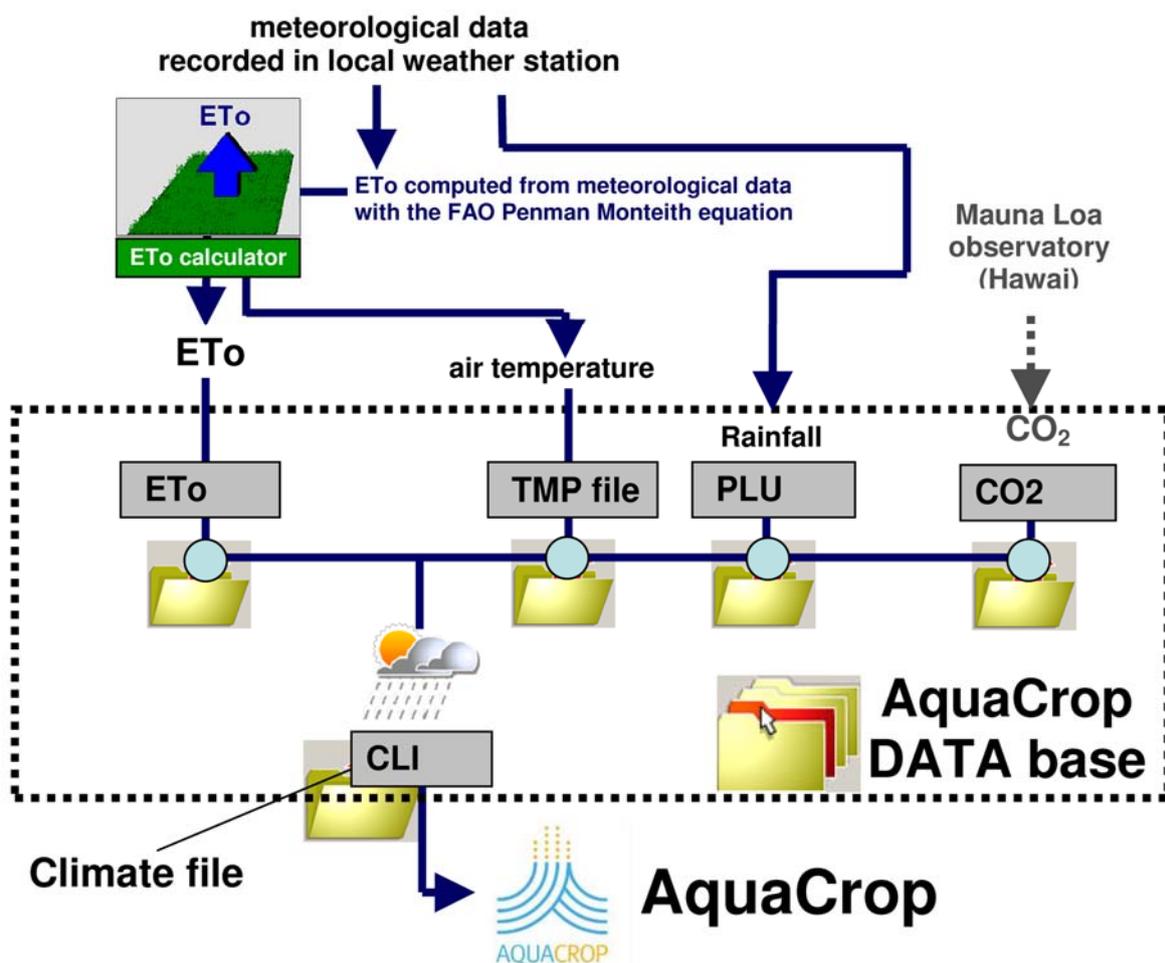


Figure 2.21 - Données climatiques et fichier Climat

2.21.2 Fichiers de température, d'ETo et de pluviométrie

Les fichiers de température (*.TMP) (Tab. 2.21b), d'ETo (*.ETo) (Tab. 2.21c) et de pluviométrie (*.PLU) (Tab. 2.21d) ont tous la même structure et consistent en :

- 5 lignes contenant des informations exigées par le programme ;
 - une ligne vide pour séparer les informations des enregistrements ;
 - 2 lignes pour le titre des enregistrements ;
 - la liste des enregistrements (1 ligne pour chaque donnée journalière, décadaire et mensuelle).
- Les données sont : la température de l'air journalière, moyenne décadaire ou les minimum et maximums mensuels en degrés Celsius ; l'ETo journalière, moyenne décadaire ou mensuelle en mm/jour et la pluviométrie total journalière, décadaire et mensuelle en mm. Les données se composent de nombres entiers ou réels avec 1 chiffre (1/10 d'un degré ou d'un millimètre).

Tableau 2.21b - Structure d'un fichier température de l'air (fichier avec extension TMP)

Ligne	Contenu du fichier
1	Description de ce qui est présenté en sélectionnant le fichier
2	1: Données journalières (1 = journalières, 2 = décadaires et 3 = mensuelles)
3	1: Premier jour d'enregistrement (1, 11 ou 21 pour les décades, ou 1 pour les mois)
4	1: Premier mois d'enregistrement
5	1999: Première année d'enregistrement (1901 si non lié à une année spécifique)
6	
7	Tmin(°C) TMax(°C)
8	=====
9	7.0 15.0
10	8.0 16.0
11	9.0 18.0

Tableau 2.21c - Structure d'un fichier d'ETo (fichier avec extension ETo)

Ligne	Contenu du fichier
1	Description de ce qui est présenté en sélectionnant le fichier
2	1: Données journalières (1 = journalières, 2 = décadaires et 3 = mensuelles)
3	1: Premier jour d'enregistrement (1, 11 ou 21 pour les décades, ou 1 pour les mois)
4	1: Premier mois d'enregistrement
5	1999: Première année d'enregistrement (1901 si non lié à une année spécifique)
6	
7	Moyenne ETo (mm/jour)
8	=====
9	1.0
10	1.1
11	1.2

Table2.21d - Structure d'un fichier pluviométrie (fichier avec extension PLU)

Ligne	Contenu du fichier
1	Description de ce qui est présenté en sélectionnant le fichier
2	1: Données journalières (1 = journalières, 2 = décadaires et 3 = mensuelles)
3	1: Premier jour d'enregistrement (1, 11 ou 21 pour les décades, ou 1 pour les mois)
4	1: Premier mois d'enregistrement
5	1999: Première année d'enregistrement (1901 si non lié à une année spécifique)
6	
7	Pluviométrie Total (mm)
8	=====
9	0.0
10	0.0
11	16.6

2.21.3 Fichier CO₂

Un fichier CO₂ (*.CO2) contient la moyenne annuelle de données de CO₂ atmosphérique (en ppm) pour une série d'années organisée en ordre chronologique. Pour les années non spécifiées dans le fichier, AquaCrop générera au moment de la simulation la concentration en CO₂ par interpolation linéaire entre les valeurs de CO₂ spécifiées de la première et la dernière année. Pour les années en dehors de la plage de liste, la concentration atmosphérique de CO₂ est supposée être égale à la valeur spécifiée de la première année (pour les années précédentes) ou la valeur spécifiée pour la dernière année (pour le reste des années). En créant le fichier CO₂, la structure du fichier doit être respectée (Tab. 2.21e).

Tableau 2.21e - Structure d'un fichier CO2 (fichier avec extension CO2)

Ligne	Contenu du fichier	Explication
1	La première ligne est une description	description
2	Année CO2 (volume par ppm)	titre
3	=====	titre
4	1940 310.5	année (1) et CO2 correspondant
5	1960 316.91	année (2) et CO2 correspondant
6	1961 317.65	année (3) et CO2 correspondant
...
n-1	2007 383.72	année (n-1) et CO2 correspondant
n	2020 409.72	année (n) et CO2 correspondant

2.21.4 Fichier culture (*.CRO)

2.21.5 Fichier irrigation (*.IRR)

2.21.6 Fichier gestion de parcelle (*.MAN)

2.21.7 Fichier profil de sol (*.SOL)

2.21.8 Fichier eaux souterraines (*.GWT)

2.21.9 Fichier conditions initiales (*.SW0)

2.21.10 Fichier conditions hors-saison (*.OFF)

2.21.11 Fichier simulation unique (*.PRO)

2.21.12 Fichier simulations multiples (*.PRM)

2.21.13 Fichier observations/données de terrain (*.OBS)

2.22 Fichiers des paramètres de configuration du programme

2.23 Fichiers des données de sortie

Les résultats de simulation sont enregistrés dans un ensemble de fichiers de données de sortie. Par défaut, les fichiers de données de sortie sont stockés dans le sous-répertoire OUP du dossier AquaCrop. La distinction est faite entre des fichiers de données de sortie contenant des données journalières et des résultats saisonniers. Les fichiers de données de sortie avec des données journalières contiennent des informations sur :

- Le développement et la production de la culture ;
- La teneur en eau du sol aux profondeurs diverses de profil de sol ;
- La salinité du sol aux profondeurs diverses de profil de sol ;
- La teneur en eau du sol dans le profil de sol et dans la zone racinaire ;
- La salinité du sol dans le profil de sol et dans la zone racinaire ;
- Les différents paramètres du bilan d'eau du sol ;
- Le besoin net en eau d'irrigation.

Les variables inscrites dans les fichiers de données de sortie sont présentés dans les tableaux 2.23.1 à 2.23.7. Les variables inscrites dans le fichier de données de sortie saisonnier sont données dans 2.23.8. Les données dans les fichiers peuvent être ouvertes avec des tableurs pour d'autres processus et analyses.

2.23.1 Développement et production de la culture

Nom de fichier par défaut: **ProjetCROP.OUT**

N°	Symbole	Description	Unité
1	Jour		-
2	Mois		-
3	Année		-
4	DAP	Jours après plantation/semis	-
5	Stade	Stade de croissance de la culture: 0: avant ou après la culture ; 1: entre semis/germination ou relèvement de transplantation ; 2: développement végétatif ; 3: floraison ; 4: formation du rendement et maturation ; -9: pas de récolte, résultat d'une sénescence précoce de la canopée	-
6	GD	Degrés de croissance	°C-jour
7	Z	Profondeur d'enracinement effectif	m
8	StExp	Pourcentage du stress hydrique réduisant l'expansion des feuilles	%
9	StSto	Pourcentage du stress hydrique induisant la fermeture des stomates	%
10	StSen	Pourcentage du stress hydrique déclenchant une sénescence précoce de la canopée	%
11	StSalt	Pourcentage de stress de salinité	%
12	CC	Couverture de canopée verte	%
13	Kc(Tr)	Coefficient de culture pour transpiration	-
14	Trx	Transpiration maximale de culture	mm
15	Tr	Transpiration réelle de culture	mm
16	T/Tx	Transpiration relative (100 Tr/Trx)	%
17	WP	Productivité de l'eau pour une culture ajustée pour le CO ₂ , la	g/m ²

		fertilité du sol et les produits synthétisés	
18	StBio	Pourcentage de stress de température affectant la production de biomasse	%
19	Biomasse	Biomasse produite cumulée	ton/ha
20	HI	Indice de récolte ajusté pour l'échec de pollinisation, photosynthèse inadéquate et stress hydrique	%
21	Yield Part	Rendement (HI x Biomasse)	ton/ha
22	Brelative	Biomasse relative (Référence: pas de stress hydrique, ni de stress fertilité du sol, ni de stress de salinité du sol)	%
23	WPet	ET productivité de l'eau pour la part de rendement (kg de rendement produit par m ³ d'eau évapotranspirée)	kg/m ³

2.23.2 Bilan Sol-Eau

Nom de fichier par défaut: **Projet WABAL.OUT**

N°	Symbole	Description	Unité
1	Jour		-
2	Mois		-
3	Année		-
4	DAP	Jours après plantation/semis	-
5	Stage	Etape de croissance de culture: 0: avant et après la culture; 1: entre semis/germination ou relèvement de transplantation; 2: développement végétatif; 3: floraison; 4: formation du rendement et maturation -9: pas de récolte, résultat d'une sénescence précoce de canopée.	-
6	WCTot	Teneur en eau totale pour le profil de sol	mm
7	Rain	Pluviométrie	mm
8	Irri	Dose d'irrigation	mm
9	Surf	Eau stockée sur la surface du sol entre les diguettes	mm
10	Infilt	Eau infiltrée dans le profil de sol	mm
11	RO	Ruissellement	mm
12	Drain	Eau drainée hors du profil de sol	mm
13	CR	Eau remontée par capillarité	mm
14	Ex	Evaporation maximale de sol	mm
15	E	Evaporation réelle de sol	mm
16	E/E	Evaporation relative (100 E/EX)	%
17	Trx	Transpiration maximale de la culture	mm
18	Tr	Transpiration réelle de la culture	mm
19	T/T	Transpiration relative (100 Tr/Trx)	%
20	ETx	Evapotranspiration maximale	mm
21	ET	Evaporation réelle	mm
22	ET/ETx	Evapotranspiration relative (100 ET/ETx)	%

2.23.3 Teneur en eau du sol (profil et zone racinaire)

Nom de fichier par défaut: **ProjetProf.OUT**

N°	Symbole	Description	Unité
1	Jour		-
2	Mois		-
3	Année		-
4	DAP	Jours après plantation/semis	-
5	Stage	Phase de croissance de culture: 0: avant et après la culture; 1: entre semis/germination ou relèvement de transplantation; 2: développement végétatif; 3: floraison; 4: formation du rendement et maturation -9: pas de récolte, résultat d'une sénescence précoce de canopée.	-
6	WCTot	Teneur en eau totale du profil de sol	mm
7	Wr(Zx)	Teneur en eau de la zone racinaire maximale effective	mm
8	Z	Profondeur effective de racines	m
9	Wr	Teneur en eau de la zone racinaire effective	mm
10	Wr(SAT)	Teneur en eau de la zone racinaire effective si saturée	mm
11	Wr(FC)	Teneur en eau de la zone racinaire effective à la capacité au champ.	mm
12	Wr(exp)	Teneur en eau de la zone racinaire effective au seuil supérieur pour l'expansion de la feuille.	mm
13	Wr(sto)	Teneur en eau de la zone racinaire effective au seuil supérieur pour la fermeture des stomates.	mm
14	Wr(sen)	Teneur en eau en zone racinaire effective au seuil supérieur pour une sénescence précoce de la canopée.	mm
15	Wr(PWP)	Teneur en eau de la zone racinaire effective au point de flétrissement permanent.	mm

2.23.4 Salinité du sol (profil et zone racinaire)

Nom de fichier par défaut: **ProjetSalt.OUT**

N°	Symbole	Description	Unité
1	Jour		-
2	Mois		-
3	Année		-
4	JAP	Jours après plantation/semis	-
5	Etape	Phase de croissance de la culture: 0: avant et après la culture; 1: entre semis/germination ou relèvement de transplantation; 2: développement végétatif; 3: floraison; 4: formation du rendement et maturation -9: pas de récolte, résultat d'une sénescence précoce	-
6	SaltIn	Sel infiltré dans le profil de sol	tonne/ha
7	SaltOut	Sel drainé hors du profil de sol	tonne/ha
8	SaltTot	Sel total accumulé dans le profil de sol	tonne/ha

9	SaltZ	Sel accumulé dans la zone racinaire effective	tonne/ha
10	Z	Profondeur effective de la zone racinaire	m
11	ECe	Conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée de sol de la zone racinaire	dS/m
12	ECsw	Conductivité électrique de l'eau du sol dans la zone racinaire	dS/m
13	StSalt	Stress de salinité	%
14	Zgwt	Profondeur de la nappe des eaux souterraines	m
15	ECgw	Conductivité électrique de la nappe des eaux souterraines	dS/m

2.23.5 Teneur en eau du sol (compartiments)

Nom de fichier par défaut: **ProjetCompWC.OUT**

N°	Symbole	Description	Unité
1	Jour		-
2	Mois		-
3	Année		-
4	DAP	Jours après plantation/semis	-
5	Stage	Phase de croissance de la culture: 0: avant et après la culture; 1: entre semis/germination ou relèvement de transplantation; 2: développement végétatif; 3: floraison; 4: formation de rendement et maturation -9: pas de récolte, résultat d'une sénescence précoce de canopée.	-
6	WC1	Teneur en eau du sol compartiment 1 *	vol%
7	WC2	Teneur en eau du sol compartiment 2	vol%
8	WC3	Teneur en eau du sol compartiment 3	vol%
9	WC4	Teneur en eau du sol compartiment 4	vol%
10	WC5	Teneur en eau du sol compartiment 5	vol%
11	WC6	Teneur en eau du sol compartiment 6	vol%
12	WC7	Teneur en eau du sol compartiment 7	vol%
13	WC8	Teneur en eau du sol compartiment 8	vol%
14	WC9	Teneur en eau du sol compartiment 9	vol%
15	WC10	Teneur en eau du sol compartiment 10	vol%
16	WC11	Teneur en eau du sol compartiment 11	vol%
17	WC12	Teneur en eau du sol compartiment 12	vol%

* La profondeur du sol (correspondant au centre du compartiment) est spécifiée pour chaque compartiment dans le fichier.

2.23.6 Salinité du sol (compartiments)

Nom de fichier par défaut: **ProjetCompec.OUT**

N°	Symbole	Description	Unité
1	Jour		-
2	Mois		-
3	Année		-
4	DAP	Jours après plantation/semis	-
5	Stage	Phase de croissance de culture: 0: avant et après la culture;	-

		1: entre semis/germination ou relèvement de transplantation; 2: développement végétatif; 3: floraison; 4: formation de rendement et maturation -9: pas de récolte, résultats d'une sénescence précoce de canopée.	
6	EC1	Conductivité électrique de l'extrait de la pâte saturée de sol (ECe) compartiment 1*	dS/m
7	EC2	Conductivité électrique de l'extrait de la pâte saturée de sol (ECe)- Compartiment 2	dS/m
8	EC3	Conductivité électrique de l'extrait de la pâte saturée de sol (ECe)- compartiment 3	dS/m
9	EC4	Conductivité électrique de l'extrait de la pâte saturée de sol (ECe)- compartiment 4	dS/m
10	EC5	Conductivité électrique de l'extrait de la pâte saturée de sol (ECe)- compartiment 5	dS/m
11	EC6	Conductivité électrique de l'extrait de la pâte saturée de sol (ECe)- compartiment 6	dS/m
12	EC7	Conductivité électrique de l'extrait de la pâte saturée de sol (ECe)- compartiment 7	dS/m
13	EC8	Conductivité électrique de l'extrait de la pâte saturée de sol (ECe)- compartiment 8	dS/m
14	EC9	Conductivité électrique de l'extrait de la pâte saturée de sol (ECe)- compartiment 9	dS/m
15	EC10	Conductivité électrique de l'extrait de la pâte saturée de sol (ECe)- compartiment 10	dS/m
16	EC11	Conductivité électrique de l'extrait de la pâte saturée de sol (ECe)- compartiment 11	dS/m
17	EC12	Conductivité électrique de l'extrait de la pâte saturée de sol (ECe)- compartiment 12	dS/m

* La profondeur du sol (correspondant au centre du compartiment) est spécifiée pour chaque compartiment dans le fichier.

2.23.7 Besoin net en irrigation

Nom de fichier par défaut: **ProjetInet.OUT**

N°	Symbole	Description	Unité
1	Jour		-
2	Mois		-
3	Année		-
4	DAP	Jours après plantation/semis	-
5	Stage	Phase de croissance de culture: 0: avant et après la culture; 1: entre semis/germination ou relèvement de transplantation; 2: développement végétatif; 3: floraison; 4: formation de rendement et maturation -9: pas de récolte, résultat d'une sénescence précoce de canopée.	-
6	E	Evaporation réelle du sol	mm

7	Trx	Transpiration maximale de culture	mm
8	ET	Evapotranspiration: Somme de E et de Trx	mm
9	Pluie	Pluviométrie	mm
10	Inet	Besoin net en irrigation	mm

2.23.8 Sortie saisonnière

Nom de fichier par défaut: **ProjectRun.OUT**

N°	Symbole	Description	Unité
1	RunNr	Numéro de simulation	-
2	Day1	Jour du début de simulation	-
3	Month1	Mois du début de simulation	-
4	Year1	Année du début de simulation	-
5	Rain	Pluviométrie	mm
6	ETo	Evapotranspiration de référence	
7	GD	Degrés de croissance	
8	CO2	Concentration atmosphérique en CO2	
9	Irri	dose d'irrigation ou besoin net en irrigation	mm
10	Infilt	Eau infiltrée dans le profil de sol	mm
11	Runoff	Pertes en eau par ruissellement	
12	Drain	Eau drainée hors du profil de sol	
13	Upflow	Remontée capillaire	
14	E	Evaporation de sol	mm
15	E/Ex	Evaporation relative de sol (100 E/Ex)	%
16	Tr	Transpiration d'une culture	mm
17	Tr/Trx	Transpiration Relative de culture (100 Tr/Trx)	%
18	SaltIn	Sel infiltré dans le profil de sol	
19	SaltOut	Sel drainé hors du profil de sol	
20	SelUp	Sel accumulée par remontée capillaire de l'eau souterraine	
21	SelProf	Sel accumulée dans le profil de sol	tonne/ha
22	Cycle	La durée du cycle de culture: de la germination à la maturité (ou senescence précoce)	
23	SelStr	Stress moyenne de salinité du sol	
24	FertStr	Stress moyenne de fertilité du sol	
25	TempStr	Stress moyenne de température (affectant la biomasse)	
26	ExpStr	Stress moyenne d'expansion de la feuille.	
27	StoStr	Stress moyenne des stomates	
28	Biomass	Biomasse cumulative produite	tonne/ha
29	Brelative	Biomasse relative (Référence: pas de stress hydrique, pas de stress fertilité et de salinité du sol)	
30	HI	Indice de récolte ajustée pour l'échec de la pollinisation, photosynthèse inadéquate, et stress hydrique	%
31	Rendement	Rendement (HI x Biomasse)	
32	WPet	ET productivité de l'eau pour la part de rendement (kg de rendement produit par m3 d'eau évapotranspirée)	kg/m3
33	JourN	Dernier jour de la simulation	-
34	MoisN	Dernier mois de la simulation	-
35	AnnéeN	Dernière année de la simulation	-

