



Modélisation des impacts de la plantation d'arbres exotiques sur l'hydrologie du bassin de Soarano à l'aide du modèle SPHY

Travail de stage de Master 2 de Saba Daeichin sous la supervision de Marie Nourtier (Nitidæ)

Dans le cadre du projet Kolorano (Agrisud International et Nitidæ)

Février 2019 – Novembre 2020





Table des matières

| | |
|--|----|
| Résumé..... | 4 |
| 1_ Introduction..... | 5 |
| 2_ Site d'étude : le bassin versant de Soarano | 6 |
| 3_ Présentation du modèle SPHY | 7 |
| 4_ Données d'entrée | 7 |
| 5_ Approche de modélisation..... | 10 |
| 5.1. Configuration du modèle | 10 |
| 5.2. Définition des scénarios d'occupation du sol..... | 10 |
| 6_ Résultats des simulations..... | 13 |
| 6.1. Le bilan hydrique de la première couche du sol (SW1)..... | 13 |
| 6.2. Le changement de stockage de l'eau (ΔS) | 15 |
| 6.3. Le débit à l'exutoire | 16 |
| 7_ Discussion | 19 |
| 7.1. Impact général des plantations..... | 19 |
| 7.2. Impacts différenciés selon les espèces plantées..... | 19 |
| 7.3. Les limites de l'étude..... | 21 |
| 8_ Conclusion | 23 |
| 8.1. Conclusion générale..... | 23 |
| 8.2. Impacts potentiels opérationnels..... | 23 |
| 9_ Bibliographie | 24 |
| 10_ Annexes | 26 |
| 10.1. Coefficient de culture (Kc) | 26 |
| 10.2. Configuration du modèle..... | 27 |
| 10.2.1. Paramètres du bassin versant..... | 27 |
| 10.2.2. Paramètres du climat | 28 |
| 10.2.3. Paramètres du sol..... | 29 |
| 10.2.4. Paramètres de l'occupation du sol..... | 30 |
| 10.2.5. Les options du rapport et exécution du modèle | 30 |



Table des figures

| | |
|--|----|
| Figure 1 : Localisation du bassin versant de Soarano (Agrisud, 2016) | 6 |
| Figure 2 : Moyennes mensuelles de la précipitation et de la température à Soarano (CFSR, 2020).. | 6 |
| Figure 3 : Concepts de modélisation de SPHY (Terink et al., 2015)..... | 8 |
| Figure 4 : Les scénarios d'occupation du sol : a) Référence, b) Plantation d'arbres à 10%, c) Plantation d'arbres à 30%, d) Plantation d'arbres à 50%, e) Future projection, de) Savanisation..... | 12 |
| Figure 5 : Le bilan hydrique annuel moyen de la première couche du sol sur l'ensemble du bassin versant (en mm)..... | 14 |
| Figure 6 : Changement du bilan hydrique annuel de la première couche de sol par rapport à la situation de référence (carte de 2016 – changement en %) | 14 |
| Figure 7 : Moyenne annuelle de la quantité d'eau stockée dans le sol (en mm)..... | 15 |
| Figure 8 : Changement de la moyenne annuelle de stockage par rapport à la situation de référence (en %)..... | 16 |
| Figure 9 : Moyenne annuelle du débit des rivières (l/s) | 18 |
| Figure 10 : Pourcentages de changement du débit moyen des rivières du bassin versant par rapport à l'occupation du sol initiale | 18 |
| Figure 11 : Carte de profondeur des racines | 29 |
| Figure 12 : Carte de l'occupation du sol..... | 30 |

Liste des tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau 1 : Liste de données d'entrée avec leur résolution et leurs sources..... | 9 |
| Tableau 2 : Liste des coefficients de culture (Kc) et de la profondeur des racines (mm)..... | 9 |
| Tableau 3 : Superficie de chaque occupation du sol pour les différents scénarios (en ha) | 11 |
| Tableau 4 : Le bilan hydrique mensuel moyen (sur 10 ans) de la première couche du sol (en mm) | 14 |
| Tableau 5 : Le changement mensuel moyen de stockage d'eau dans le sol (en mm) | 16 |
| Tableau 6 : L'évapotranspiration réelle (ETa) de l'Eucalyptus et de l'Acacia dans la bibliographie utilisée | 27 |
| Tableau 7 : Cartes des paramètres du bassin..... | 27 |



Résumé

À Madagascar, afin de restaurer la ressource ligneuse et un couvert arboré dans les vastes zones précédemment déforestées, le choix est souvent fait de plantations d'arbres d'espèces exotiques. Si ces espèces présentent l'avantage de leur croissance rapide utile pour l'utilisation pour les populations humaines, elles peuvent poser question quant à leur impact sur la biodiversité dans le cas d'espèces envahissantes et sur la ressource en eau. C'est ce dernier point qui est traité dans la présente étude. En effet, leur croissance rapide leur confère des besoins en eau pour la transpiration relativement important. Ainsi, si ces plantations limitent le ruissellement et améliore l'infiltration de l'eau, elles mènent également à un prélèvement plus élevé.

Dans le cadre d'un projet d'adduction d'eau et d'aménagement du territoire, le projet Kolorano, un modèle hydrologique a alors été utilisé sur le bassin versant de Soarano, situé dans la région Haute Matsiatra des Hautes Terres de Madagascar, pour évaluer l'impact potentiel des plantations sur la ressource en eau. Ce bassin versant est principalement constitué de savanes, de cultures irriguées ou non de quelques plantations de Pins. Différents scénarios de conversion des savanes (10%, 30% ou 50% des savanes) en plantations (Eucalyptus, Acacia, Pin ou agrumes) ou une savanisation complète ont été testés. Le modèle choisi est SPHY (Spatial Processes in Hydrology model), mécaniste et spatialement distribué qui intègre les principaux mécanismes du bilan hydrologique (évapotranspiration, ruissellement, drainage, etc.) et prend en compte les différents besoins en eau de la végétation (utilisation d'un coefficient cultural K_c) et les profondeurs des racines.

Les résultats montrent que la quantité d'eau dans les différentes couches du sol augmente avec les plantations, toutes espèces confondues et diminue dans le cas de la savanisation. L'impact sur la diminution du ruissellement surpasserait l'augmentation de la demande en eau. En revanche, ce même impact entraîne une diminution du débit de la rivière à l'exutoire du bassin versant, pouvant atteindre une diminution de 30% du débit dans le cas de plantation de 50% d'Eucalyptus. La comparaison entre les espèces reste toutefois difficile car la bibliographie sur les données d'entrée (notamment le coefficient cultural lié à la transpiration et la profondeur des racines) dans le contexte particulier de la zone d'étude est trop limitée et nous n'avons pas les mesures de terrain nécessaires. Des essais avec des valeurs pour la forêt naturelle ont été effectués mais les interprétations restent hasardeuse étant données le peu de références disponibles pour les paramètres liés à la transpiration.

Cet exercice de modélisation apporte tout de même des informations utiles sur l'impact des plantations exotiques sur la ressource en eau. L'impact sur le débit à l'exutoire souligne l'importance de la localisation des plantations, notamment par rapport aux sources. Par ailleurs, la réduction significative du ruissellement montre les impacts positifs dans la gestion des risques d'inondations, dans la réduction de l'érosion et dans la disponibilité de l'eau pour les cultures non irriguées.



1_ Introduction

A Madagascar, de nombreux projets de reboisement ont été entrepris au cours des dernières décennies en réponse à la forte déforestation (Vieilledent et al., 2018) et à la perte de ressource ligneuse associée ainsi qu'à la dégradation des sols et à l'érosion ayant des impacts sur la production agricole, la disponibilité de l'eau et la biodiversité (Ganzhorn et al., 2001; Futurewater, 2018). Ces projets utilisent souvent des espèces exotiques pour leur croissance rapide. Toutefois, l'impact de ces plantations sur la ressource en eau est peu connu, en particulier à Madagascar. Au Chili, Huber et al. (2008) ont signalé une augmentation de l'évapotranspiration et une diminution de la percolation des sols sous plantations de *Pinus radiata* et d'*Eucalyptus* sp., par rapport à des zones de pâturages ou couvertes d'arbustes, limitant donc la quantité d'eau disponible dans le sol. En Chine, Zhou et al. (2002) ont signalé que les plantations d'*Eucalyptus* ou la forêt naturelle réduisaient le ruissellement annuel des bassins forestiers. Jaleta et al. (2017) ont montré que l'expansion de l'*Eucalyptus* sur les prairies n'avait pas d'impact significatif sur le ruissellement de surface alors qu'il permettait de le réduire en comparaison à des terres agricoles. Ainsi, les résultats dans la littérature sur l'impact des plantations sur la ressource en eau sont mitigés. Si les plantations permettent en effet de limiter le ruissellement et normalement d'augmenter l'infiltration de l'eau, elles augmentent également le prélèvement pour leur transpiration. Le bilan n'est donc pas connu a priori. Or, dans le cadre du projet Kolorano, il a été décidé de réaliser des plantations, principalement d'espèces exotiques (à la demande des producteurs, *Eucalyptus*, Pins, Acacias pour la majorité) dans un objectif d'amélioration de la ressource en eau en parallèle d'un projet d'adduction en eau potable. Afin d'estimer l'impact potentiel des plantations d'arbres exotiques sur les processus hydrologiques dans le futur (après l'arrêt du projet) nous avons fait le choix d'utiliser un modèle car la durée du projet ne permet pas d'avoir le recul temporel suffisant pour évaluer l'évolution de la ressource en eau en lien avec les plantations.

Nous avons pris l'exemple du bassin versant de Soarano, étant le plus grand bassin suivi dans le cadre du projet Kolorano et faisant l'objet de mesure de ruissellement et d'érosion sur le terrain. Nous avons défini différents scénarios de conversion de la savane en plantations d'arbres, exotiques ou non, afin d'évaluer les impacts potentiels en 10 ans sur différentes composantes du bilan hydrologique. Cette étude a été mise en œuvre grâce à l'utilisation du modèle SPHY (Spatial Processes in Hydrology model). Il s'agit d'un modèle mécaniste, spatialement distribué, qui intègre les processus hydrologiques du bassin versant afin d'étudier les impacts des changements d'occupation du sol sur les composantes du bilan hydrique telles que l'évapotranspiration, la recharge de la nappe et le ruissellement (Terink et al., 2015).

Le présent rapport constitue un résumé de la méthode employée ainsi que des principaux résultats à destination du commanditaire, Nitidæ, responsable de la composante mesure d'impact dans le cadre du projet Kolorano.



3_ Présentation du modèle SPHY

SPHY est un modèle spatialement distribué qui intègre les processus hydrologiques du bassin versant et les caractéristiques de la végétation afin d'étudier les impacts des changements d'occupation du sol sur les composantes du bilan hydrique telles que l'évapotranspiration, la recharge de la nappe et le ruissellement (Terink et al., 2015). SPHY utilise la méthode du bilan hydrique afin de minimiser le nombre de paramètres d'entrée et d'éviter la complexité et les longues durées d'exécution du modèle (Terink et al., 2015). Il a déjà été utilisé à Madagascar (projet LAUREL - Land Use Planning for Enhanced Resilience of Landscapes - développé dans le nord-est de l'île et financé par la Banque Mondiale). Les sorties du modèle comprennent l'évapotranspiration potentielle (ETp), l'évapotranspiration réelle (ETa), le ruissellement (le débit de base, le ruissellement de surface, le ruissellement de pluie, le ruissellement de neige, le ruissellement de glacier) et la recharge de la nappe, sur une base quotidienne, mensuelle ou annuelle (Terink et al., 2015). SPHY comprend six modules: glaciers, neige, eaux souterraines, végétation dynamique, routage simple et routage lac / réservoir. Ce modèle permet à l'utilisateur d'activer ou de désactiver des modules (processus) qui sont pertinents ou non pour la zone d'intérêt (Terink et al., 2015).

Les besoins en eau de la végétation sont représentés dans le modèle par le coefficient cultural K_c qui est utilisé, selon la méthode FAO (Allen et al., 1998), comme un facteur multiplicateur de l'évapotranspiration de référence, ET_0 (calculé avec la formule de Penman-Monteith), pour connaître l'évaporation potentielle d'un type de végétation ($ETP = K_c \cdot ET_0$) (la description complète dans Annexe 10-1). Le coefficient K_c varie selon le type de végétation en fonction de ses besoins en eau. Des valeurs de référence sont disponibles dans la description de la méthode FAO¹ et d'autres peuvent être trouvées dans la littérature. Les capacités de prélèvement de la végétation sont représentées par la profondeur des racines et le type de sol. Un aperçu schématisé des concepts de modélisation SPHY est présenté dans la figure ci-après.

Il y a deux petits réservoirs à Soarano. L'un d'eux est presque comblé de sédiments et l'autre fonctionne à la moitié de sa capacité, nous avons donc décidé de ne pas considérer ces réservoirs. De plus, nous avons utilisé un coefficient cultural, K_c , constant au cours du temps (il peut varier selon l'état de la végétation au cours des saisons) au lieu d'un module de végétation dynamique car nous avons considéré les arbres comme étant à maturité et car ils sont tous sempervirents.

4_ Données d'entrée

La modélisation hydrologique avec SPHY nécessite des données spatiales qui représentent les principales caractéristiques topologiques, climatiques et pédologiques du bassin affectant son

¹ <http://www.fao.org/3/x0490e/x0490e00.htm>



hydrologie. Les données utilisées dans cette étude sont le modèle numérique de terrain (MNT), les données météorologiques, les propriétés physique du sol, la carte d'occupation du sol, la profondeur de racine et le coefficient de culture (K_c). La description de l'ensemble de données est présentée dans le Tableau 1. Les valeurs de K_c et les profondeurs de racines sont présentées dans Tableau 2. Pour les valeurs de K_c n'étant pas disponibles sur le site de la FAO, nous avons cherché des valeurs d'évapotranspiration potentielle dans la littérature et recalculé ET_0 pour la zone d'étude afin d'obtenir un K_c pour l'espèce considérée (Almedia et al., 2007; Ferraz et al., 2019; Cienciala et al., 2000 ; B. Monteiro et al., 2016)

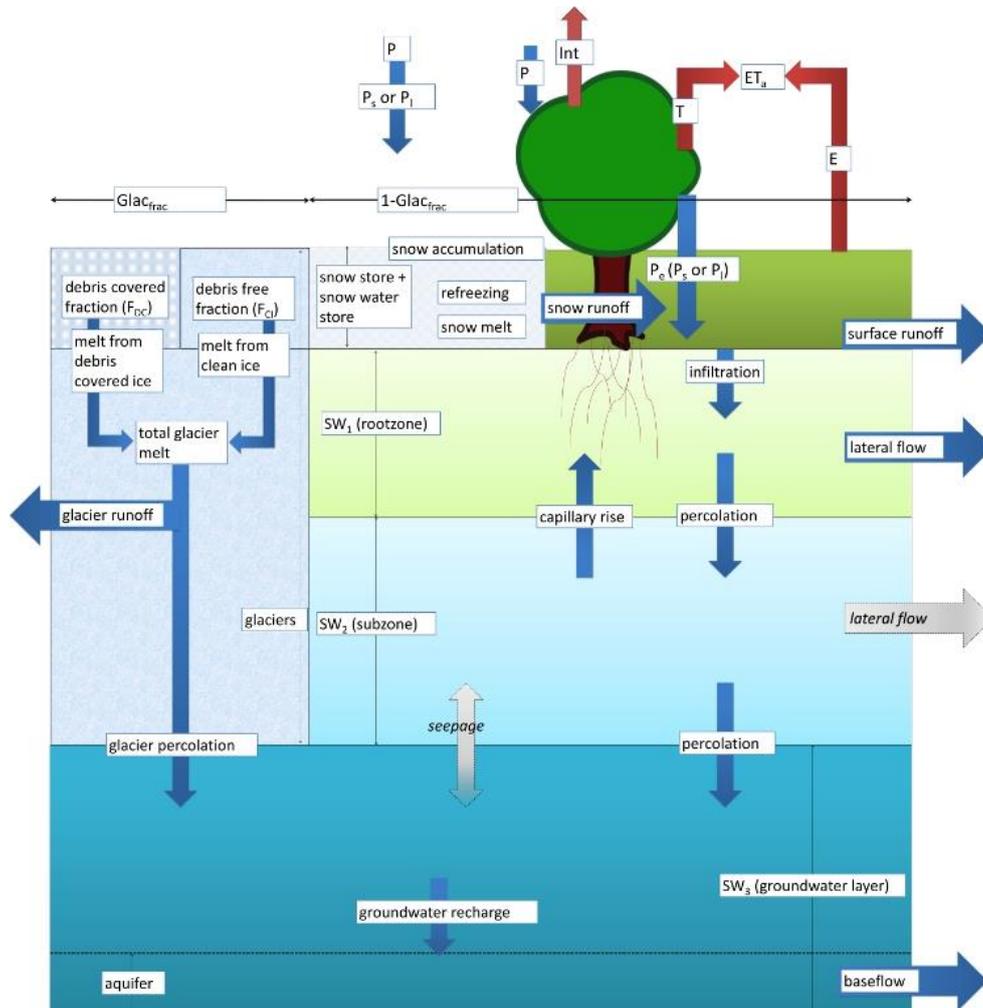


Figure 3 : Concepts de modélisation de SPHY (Terink et al., 2015)



Tableau 1 : Liste de données d'entrée avec leur résolution et leurs sources

| Données d'entrée | Résolution / échelle spatiale | Date / période | Sources |
|--------------------------------------|---|----------------|-------------------------------|
| Modèle numérique de terrain (MNT) | 30 m | 2020 | SRTM ¹ |
| Données météorologiques journalières | After 2011: 19.2-km Before 2011: 28.8-km | 2009-2019 | CFSR ² |
| Propriétés physiques du sol | 0.9 km | 2015 | HiHydrosoil ³ |
| Carte d'occupation du sol | - | 2019 | Kolorano project ⁴ |
| Coefficient de culture (Kc) | - | - | FAO ⁵ |
| Profondeur de racine | - | 2020 | FAO ⁶ |

¹https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-shuttle-radar-topographymissionsrtmnon?qtscience_center_objects=4#qt-science_center_objects

² <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/climate-forecast-system-reanalysis-cfsr>

³ <https://www.futurewater.eu/projects/hihydrosoil/>

⁴<http://etclab.org/websiq/lizmap/www/index.php/view/map/?repository=kolorano&project=Kolorano>

⁵<http://www.fao.org/3/x0490e/x0490e00.htm>

⁶ <http://www.fao.org/3/y5749e/y5749e0j.htm>

Tableau 2 : Liste des coefficients de culture (Kc) et de la profondeur des racines (mm)

| Culture | Kc | | | Profondeur des racines (mm) |
|---------------------------|--------|--------|-----------|-----------------------------|
| | Kc ini | Kc mid | Kc end | |
| <i>Eucalyptus robusta</i> | - | - | 1.05 | 1200 |
| <i>Eucalyptus grandis</i> | - | - | 1.05 | 1200 |
| <i>Acacia mangium</i> | - | - | 1.185 | 800 |
| <i>Pinus patula</i> | 1 | 1 | 1 | 700 |
| Forêt naturelle | - | - | 0.86 | 700 |
| Citrus | 0.7 | 0.65 | 0.7 | 1100 |
| Savane herbeuse | 0.3 | 0.75 | 0.75 | 230 |
| Savane arborée | 0.65 | 0.875 | 0.875 | 800 |
| Caféier | 1.05 | 1.1 | 1.1 | 900 |
| Riz | 1.05 | 1.2 | 0.60-0.90 | 500 |
| Manioc (1 an) | 0.3 | 1.1 | 0.5 | 600 |
| Manioc (2 ans) | 0.3 | 0.8 | 0.3 | 600 |
| Patate douce | - | 1.15 | 0.65 | 1000 |
| Haricots | 0.4 | 1.152 | 0.35 | 400 |
| Maïs | - | 1.2 | 0.35-0.60 | 900 |
| Arachide | - | 0.6 | 1.15 | 500 |



5_ Approche de modélisation

5.1. Configuration du modèle

Les simulations de la présente étude ont été effectuées pour une période de 10 ans allant du 1er janvier 2010 au 31 décembre 2019. En raison de la forte saisonnalité du climat dans cette zone, les sorties du modèle ont été analysées par pas de temps mensuel. Tous les cartes d'entrée ont été projetées dans la projection WGS 84 / UTM zone 38S (EPSG: 32736). La taille des pixels a été fixée à 10 x 10 mètres. Le choix de cette résolution était dû à la taille du bassin versant (Soarano est un petit bassin de 390 ha de surface) et au détail requis pour nos besoins de modélisation (identifier les points érosifs, localiser la plantation d'arbres, etc.).

5.2. Définition des scénarios d'occupation du sol

Afin d'évaluer les impacts des plantations sur les composantes du bilan hydrique du bassin versant, nous avons considéré des scénarios avec différents niveaux de couverture par des plantations : 10%, 30% et 50% en plus des plantations déjà existantes par rapport à la carte d'occupation du sol établie en 2016. Il est toujours considéré que ces plantations remplacent de la savane herbeuse. Ces pourcentages ont été choisis en raison de la couverture réaliste qui pourrait être atteinte pendant un projet. Les espèces (espèces exotiques : Pins, Eucalyptus, Acacias et agrumes) ont été choisies selon les objectifs de plantations du projet Kolorano, courants à Madagascar. Le même exercice a été effectué en considérant de la forêt naturelle à la place des plantations exotiques. Les changements de paramètres lors des simulations des différentes espèces d'arbres ou d'autres types de végétation résident dans le coefficient cultural, K_c , influençant la valeur de l'évapotranspiration et la profondeur des racines influençant la capacité de prélèvement de l'eau.

Deux scénarios supplémentaires ont été pris en compte, appelés comme suit : future projection et savanisation. Le scénario de 'future projection' est basé sur le plan d'aménagement effectué en début de projet avec les communautés locales et cartographié. Le scénario de 'savanisation' reflète la situation du bassin versant si l'ensemble des plantations étaient brûlées et converties en savane. La description de ces scénarios est présentée dans le Tableau 3.



Tableau 3 : Superficie de chaque occupation du sol pour les différents scénarios (en ha)

| Type d'occupation du sol | occupation du sol | | | Scenarios | | |
|--|--------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|--------------|
| | initiale (carte de 2016) | 10% de plantations | 30% de plantations | 50% de plantations | future projection | savanisation |
| Plantations existant initialement | | | | | | |
| Eucalyptus | 0.79 | 0.79 | 0.79 | 0.79 | 225.9 | 0 |
| Pin | 74.3 | 74.3 | 74.3 | 74.3 | 74.3 | 0 |
| Caféier | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0 |
| Autres occupations du sol | | | | | | |
| Rizière | 48.8 | 48.8 | 48.8 | 48.8 | 48.8 | 48.8 |
| Culture pluviale | 13.4 | 13.4 | 13.4 | 13.4 | 13.4 | 13.4 |
| Savane herbeuse | 157 | 157 | 157 | 157 | 0 | 300.8 |
| Savane arbuste | 68.6 | 68.6 | 68.6 | 68.6 | 0 | 0 |
| Marécage | 6.6 | 6.6 | 6.6 | 6.6 | 6.6 | 6.6 |
| Zone habitation | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 | 0.75 |
| Sol nu | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| Surface plantée dans les différents scénarios | | | 15.7 | 47.1 | 78.5 | |

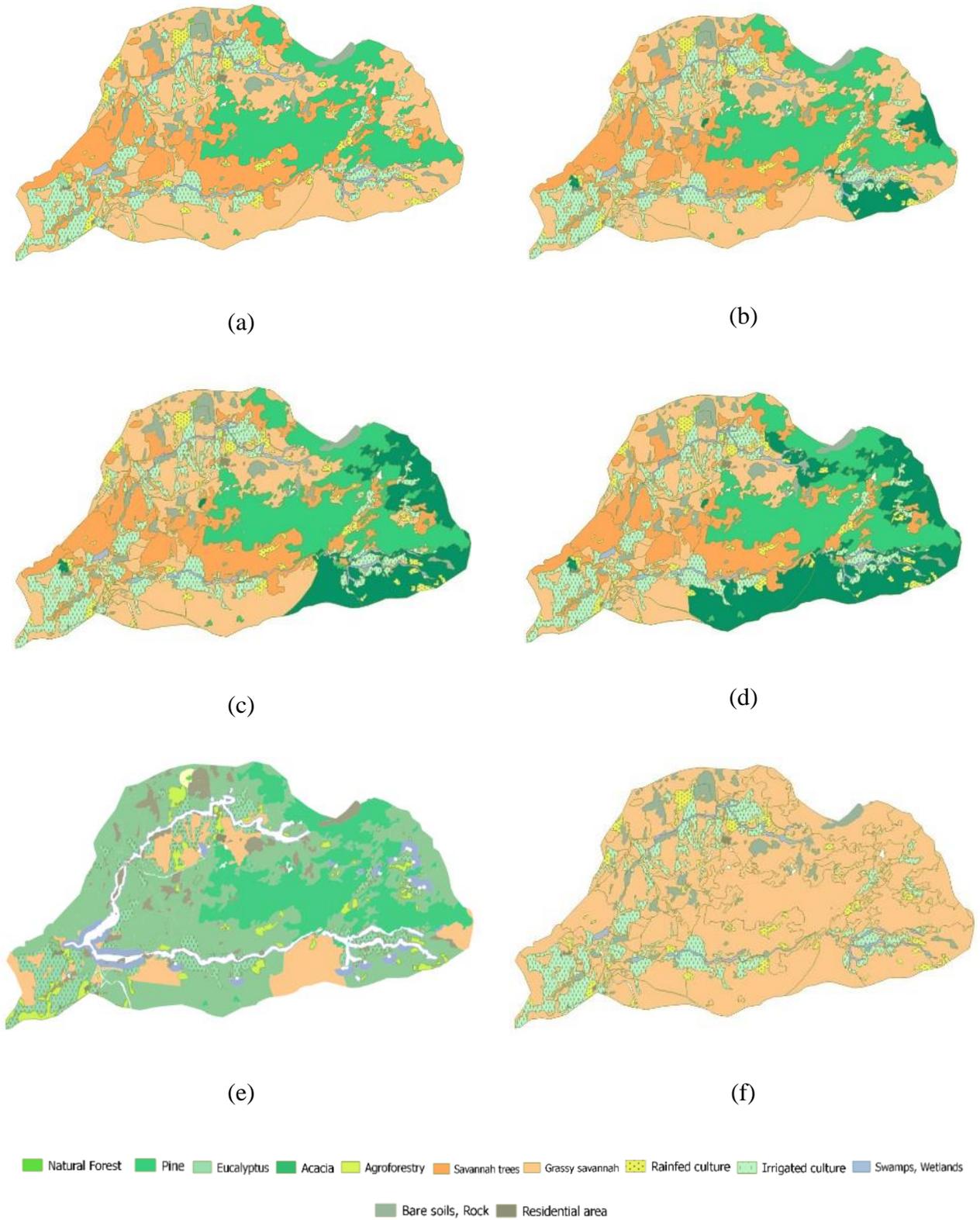


Figure 4 : Les scénarios d'occupation du sol : a) Référence, b) Plantation d'arbres à 10%, c) Plantation d'arbres à 30%, d) Plantation d'arbres à 50%, e) Future projection, de) Savanisation



6 Résultats des simulations

6.1. Le bilan hydrique de la première couche du sol (SW1)

La première couche de sol est la zone utilisée par la végétation. La quantité d'eau dans cette zone, définie par la profondeur des racines pour que la végétation puisse y puiser de l'eau, est appelé la réserve utile change. Le bilan hydrique de la première couche de sol est (Figure 3):

$$SW_1 = P - ET_a - RR_0 - Perc_1 \quad (1)$$

avec SW1 (mm) la teneur en eau dans la première couche de sol, P (mm) la précipitation, ET_a l'évapotranspiration réelle, RR₀ (mm) Ruissellement des précipitations et Perc₁ la percolation de la première à la deuxième couche de sol (Terink et al., 2015). Le ruissellement des précipitations est la somme du ruissellement de surface et du débit latéral de la première couche de sol (Terink et al., 2015).

Le Tableau 4 montre que le bilan hydrique du sol dans la zone racinaire varie entre la saison sèche et la saison humide. Cette variation est cohérente avec le niveau de précipitations saisonnières. La période décroissante commence à partir de mars et se poursuit jusqu'en octobre, qui a le niveau de précipitations le plus bas. Le maximum du bilan hydrique mensuel du sol se produit en janvier.

La comparaison des scénarios montre que, en moyenne annuelle sur les 10 années de simulation et sur l'ensemble du bassin versant, la quantité d'eau disponible dans la première couche de sol augmente avec la proportion d'arbres plantés, toutes espèces confondues (Figure 5). Toutefois, le niveau de cette augmentation diffère selon les espèces. L'augmentation du bilan hydrique du sol est plus élevée dans les scénarios de plantations d'Eucalyptus, d'Acacias et de Pin. Les résultats du scénario de Future Projection sont similaires au scénario avec 50% plantation d'Eucalyptus car dans les deux cas, de l'Eucalyptus a été planté à grande échelle. Au contraire, les scénarios de forêt naturelle et plantations d'agrumes (citrus) montre une performance plus faible qu'avec les autres espèces d'arbres plantés. La valeur du bilan la plus faible appartient au scénario de savanisation. Le taux du changement du bilan hydrique annuel du sol par rapport à l'occupation du sol initiale (carte de 2016) est montré sur la Figure 6.

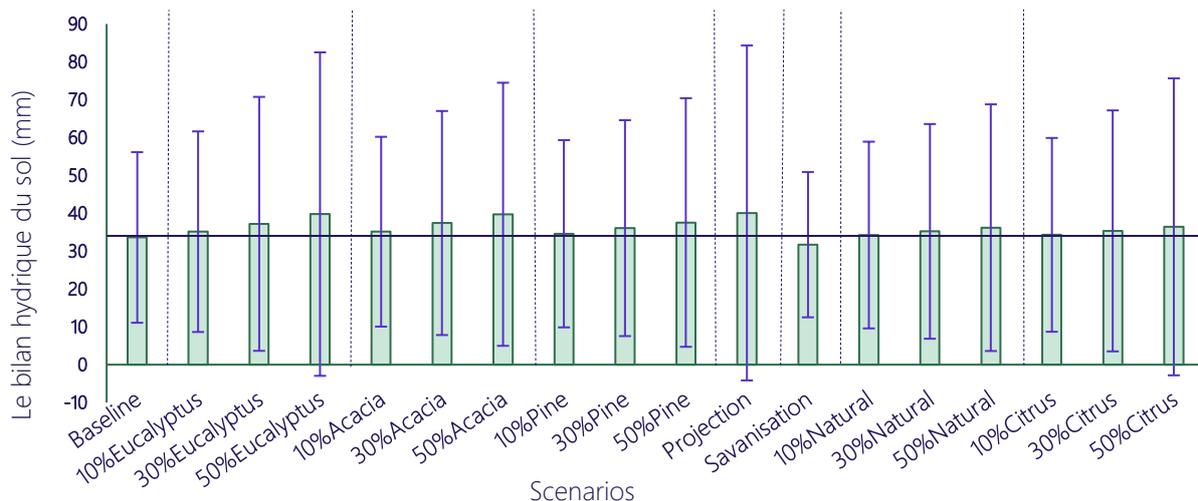


Figure 5 : Le bilan hydrique annuel moyen de la première couche du sol sur l'ensemble du bassin versant (en mm)

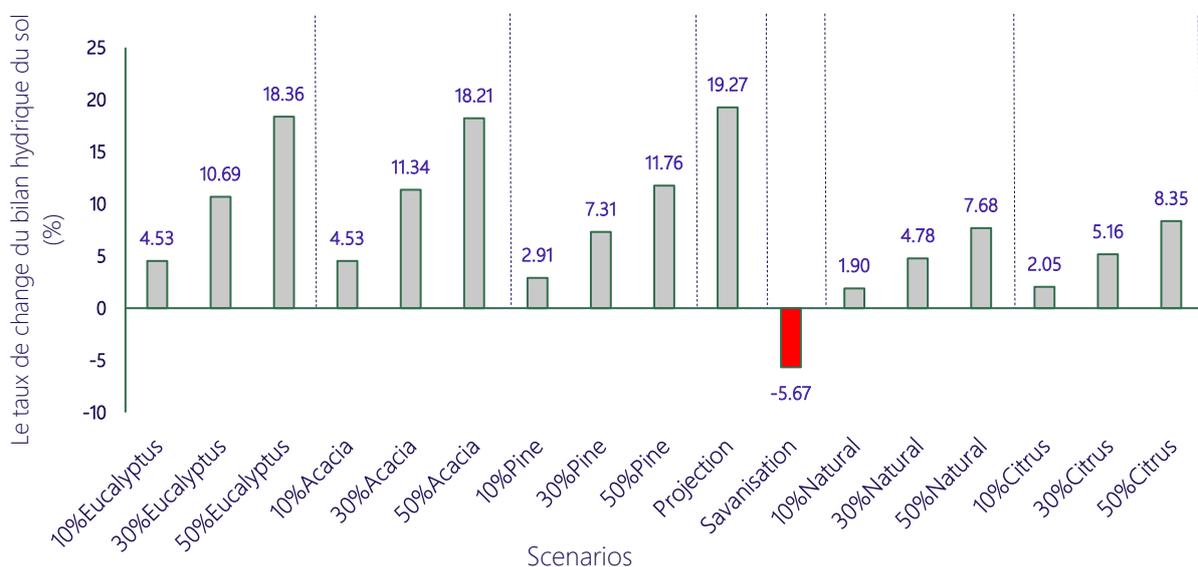


Figure 6 : Changement du bilan hydrique annuel de la première couche de sol par rapport à la situation de référence (carte de 2016 – changement en %)

Tableau 4 : Le bilan hydrique mensuel moyen (sur 10 ans) de la première couche du sol (en mm)

| Month/ Scenarios | Baseline | Eucalyptus | | | Acacia | | | Pine | | | Projection | Savanisation | Forêt naturelle | | | Citrus | | |
|---------------------|----------|------------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|------------|--------------|-----------------|-------|-------|--------|-------|-------|
| | | 10% | 30% | 50% | 10% | 30% | 50% | 10% | 30% | 50% | | | 10% | 30% | 50% | 10% | 30% | 50% |
| Jan | 53.3 | 54.6 | 56.4 | 59.3 | 53.2 | 52.9 | 53.4 | 53.3 | 53.3 | 54.2 | 58.8 | 52.1 | 53.1 | 52.7 | 53.3 | 53.4 | 53.6 | 54.6 |
| Feb | 15.0 | 15.6 | 16.6 | 16.4 | 15.5 | 16.4 | 16.2 | 14.4 | 13.6 | 11.7 | 15.7 | 17.5 | 14.4 | 13.5 | 11.7 | 13.9 | 12.3 | 9.8 |
| Mar | -16.5 | -17.8 | -19.7 | -21.2 | -18.6 | -21.9 | -24.6 | -17.8 | -19.8 | -21.2 | -21.2 | -14.4 | -17.3 | -18.6 | -19.4 | -17.1 | -18.2 | -18.6 |
| Apr | -26.1 | -31.0 | -37.6 | -45.7 | -32.0 | -40.8 | -49.7 | -30.4 | -36.8 | -43.4 | -45.9 | -18.0 | -28.9 | -33.2 | -37.7 | -27.4 | -29.4 | -31.5 |
| May | -20.9 | -27.8 | -37.2 | -48.7 | -26.0 | -33.7 | -41.5 | -25.4 | -32.1 | -39.0 | -50.3 | -11.7 | -25.3 | -31.9 | -38.7 | -24.2 | -29.1 | -34.3 |
| Jun | -12.0 | -17.7 | -25.7 | -34.4 | -14.2 | -17.4 | -20.5 | -14.2 | -17.4 | -20.5 | -36.3 | -7.3 | -14.9 | -19.2 | -23.4 | -16.0 | -22.0 | -27.9 |
| Jul | -8.6 | -13.4 | -20.4 | -27.8 | -9.7 | -11.4 | -13.0 | -9.7 | -11.4 | -13.0 | -29.4 | -5.8 | -10.4 | -13.0 | -15.6 | -13.9 | -21.8 | -29.7 |
| Aug | -8.2 | -11.3 | -15.8 | -20.6 | -8.7 | -9.4 | -10.1 | -9.0 | -10.3 | -11.5 | -22.1 | -6.3 | -9.3 | -10.8 | -12.4 | -13.9 | -22.3 | -30.8 |
| Sep | 0.5 | -1.8 | -5.1 | -8.5 | 0.3 | 0.0 | -0.3 | 0.1 | -0.5 | -1.2 | -9.3 | 1.7 | -0.5 | -2.1 | -3.7 | -4.0 | -10.6 | -17.2 |
| Oct | 21.8 | 23.8 | 26.6 | 30.1 | 23.5 | 25.9 | 28.8 | 23.6 | 26.2 | 29.2 | 31.3 | 17.8 | 23.8 | 26.7 | 29.9 | 22.6 | 23.8 | 25.3 |
| Nov | 31.0 | 39.6 | 51.8 | 65.9 | 37.5 | 47.2 | 57.3 | 37.7 | 47.9 | 58.4 | 71.4 | 16.1 | 38.5 | 49.9 | 61.5 | 41.9 | 58.3 | 75.1 |
| Dec | 4.3 | 22.3 | 47.3 | 75.1 | 14.4 | 29.5 | 43.6 | 11.9 | 23.3 | 33.8 | 77.4 | -10.1 | 11.1 | 21.4 | 30.7 | 18.9 | 40.7 | 61.6 |
| Total | 33.6 | 35.1 | 37.2 | 39.8 | 35.1 | 37.4 | 39.7 | 34.6 | 36.1 | 37.6 | 40.1 | 31.7 | 34.2 | 35.2 | 36.2 | 34.3 | 35.3 | 36.4 |
| Moyenne | 2.80 | 2.93 | 3.10 | 3.31 | 2.93 | 3.12 | 3.31 | 2.88 | 3.00 | 3.13 | 3.34 | 2.64 | 2.85 | 2.93 | 3.02 | 2.86 | 2.94 | 3.03 |



6.2. Le changement de stockage de l'eau (ΔS)

Le changement de stockage dans les couches inférieures du sol (Figure 3) est décrit par l'équation suivante:

$$\Delta S = P - ET_a - RR_0 \quad (2)$$

Avec ΔS (mm) le changement de stockage, P (mm) la précipitation, ET_a (mm) l'évapotranspiration réelle et RR_0 (mm) Ruissellement des précipitations.

Le Tableau 5 montre que le ΔS simulé pour tous les scénarios a diminué pendant les saisons sèches (mai - septembre) par rapport aux saisons humides (d'octobre à avril). La valeur la plus élevée est obtenue en janvier et la valeur la plus basse en juillet.

Sur la Figure 7, la comparaison des scénarios montre que les ΔS annuels moyens augmentent avec la proportion d'arbres plantés ce qui est cohérent avec ce qui est observé pour SW1. De même, l'augmentation du changement de stockage est plus forte dans le cas des scénarios de plantation d'Eucalyptus, d'Acacias et de Pin. Les résultats du scénario de Future Projection sont également similaires au scénario avec 50% plantation d'Eucalyptus. Au contraire, les scénarios de forêt naturelle et plantations d'agrumes (citrus) montre une performance plus faible que les autres espèces d'arbres plantés. La valeur la plus basse appartient au scénario de savanisation. Le taux du changement du changement de stockage avec la référence est montré dans la Figure 8.

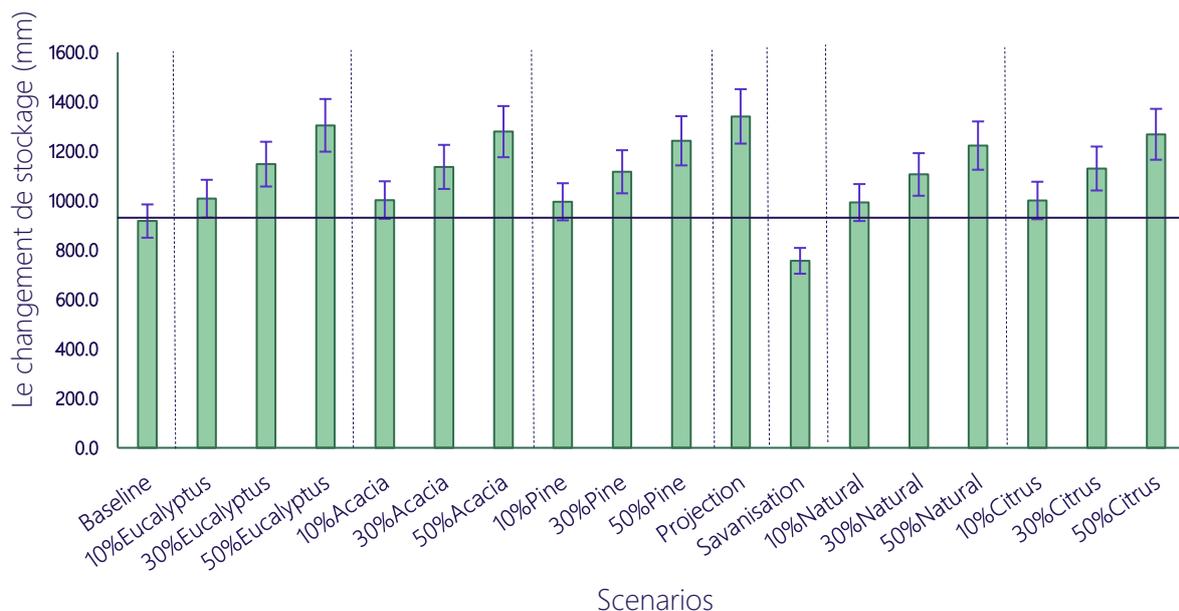


Figure 7 : Moyenne annuelle de la quantité d'eau stockée dans le sol (en mm)

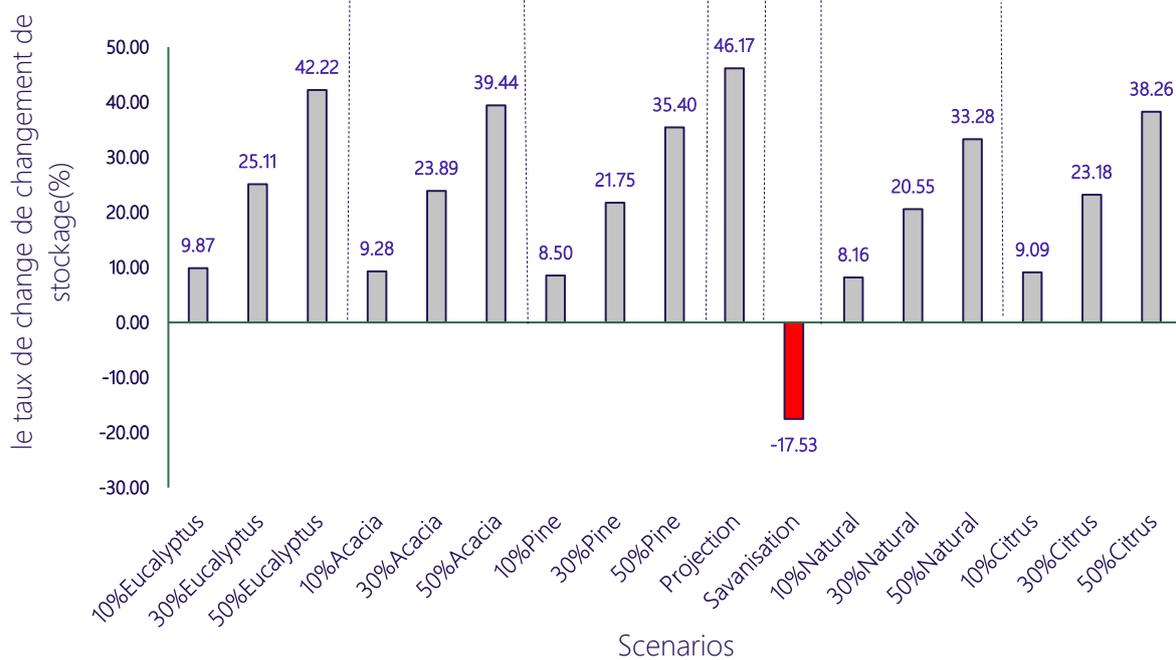


Figure 8 : Changement de la moyenne annuelle de stockage par rapport à la situation de référence (en %)

Tableau 5 : Le changement mensuel moyen de stockage d'eau dans le sol (en mm)

| Month/ Scenarios | Baseline | Eucalyptus | | | Acacia | | | Pine | | | Projection | Savanisation | Forêt naturel | | | Citrus | | |
|---------------------|----------|------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|------------|--------------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | 10% | 30% | 50% | 10% | 30% | 50% | 10% | 30% | 50% | | | 10% | 30% | 50% | 10% | 30% | 50% |
| Jan | 208.7 | 233.2 | 270.1 | 311.5 | 231.2 | 266.0 | 302.3 | 229.3 | 260.7 | 292.5 | 320.6 | 167.2 | 228.5 | 257.7 | 287.4 | 230.9 | 265.2 | 301.6 |
| Feb | 137.5 | 153.6 | 177.9 | 203.0 | 152.7 | 176.3 | 199.2 | 151.0 | 171.6 | 190.4 | 208.1 | 113.1 | 150.4 | 169.3 | 186.5 | 151.6 | 173.4 | 194.4 |
| Mar | 99.6 | 109.8 | 125.0 | 143.0 | 109.2 | 124.0 | 140.7 | 108.3 | 121.4 | 135.7 | 146.6 | 81.8 | 107.8 | 119.5 | 132.5 | 108.3 | 121.7 | 136.9 |
| Apr | 51.1 | 53.5 | 56.8 | 60.7 | 53.3 | 56.7 | 60.3 | 53.1 | 56.1 | 59.3 | 61.5 | 46.8 | 53.0 | 55.6 | 58.5 | 53.0 | 55.9 | 59.2 |
| May | 24.7 | 24.9 | 25.2 | 25.6 | 24.9 | 25.3 | 25.6 | 24.9 | 25.2 | 25.6 | 25.6 | 24.2 | 24.9 | 25.2 | 25.6 | 24.8 | 25.1 | 25.4 |
| Jun | 13.9 | 14.2 | 14.6 | 15.2 | 14.2 | 14.6 | 15.2 | 14.2 | 14.6 | 15.2 | 15.3 | 13.2 | 14.2 | 14.5 | 15.1 | 14.1 | 14.4 | 14.9 |
| Jul | 7.2 | 7.2 | 7.2 | 7.2 | 7.2 | 7.2 | 7.2 | 7.2 | 7.2 | 7.2 | 7.2 | 7.2 | 7.2 | 7.2 | 7.2 | 7.2 | 7.2 | 7.1 |
| Aug | 5.7 | 5.7 | 5.7 | 5.7 | 5.7 | 5.7 | 5.7 | 5.7 | 5.7 | 5.7 | 5.7 | 5.7 | 5.7 | 5.7 | 5.7 | 5.7 | 5.7 | 5.7 |
| Sep | 9.5 | 9.5 | 9.5 | 9.5 | 9.5 | 9.5 | 9.5 | 9.5 | 9.5 | 9.5 | 9.5 | 9.5 | 9.5 | 9.5 | 9.5 | 9.5 | 9.5 | 9.5 |
| Oct | 61.2 | 62.3 | 64.0 | 66.4 | 62.3 | 64.0 | 66.4 | 62.3 | 64.0 | 66.4 | 67.2 | 58.1 | 62.3 | 64.0 | 66.4 | 62.3 | 64.0 | 66.4 |
| Nov | 133.7 | 142.6 | 157.0 | 174.2 | 142.6 | 157.0 | 174.0 | 142.4 | 156.4 | 172.8 | 179.8 | 112.6 | 142.2 | 156.1 | 172.1 | 142.9 | 157.1 | 174.1 |
| Dec | 164.5 | 191.3 | 234.5 | 282.5 | 189.6 | 230.1 | 272.9 | 187.4 | 224.2 | 261.6 | 293.6 | 116.9 | 186.5 | 221.3 | 256.1 | 190.2 | 230.5 | 273.2 |
| Total | 917.3 | 1007.8 | 1147.6 | 1304.6 | 1002.4 | 1136.4 | 1279.1 | 995.3 | 1116.8 | 1242.1 | 1340.8 | 756.5 | 992.2 | 1105.8 | 1222.6 | 1000.7 | 1129.9 | 1268.3 |
| Moyenne | 76.44 | 83.9 | 95.6 | 108.7 | 83.5 | 94.7 | 106.5 | 82.9 | 93.0 | 103.5 | 111.7 | 63.0 | 82.6 | 92.1 | 101.8 | 83.3 | 94.1 | 105.6 |

6.3. Le débit à l'exutoire

Le débit à l'exutoire est le transport de l'eau à travers un réseau à canal ouvert. Pour calculer ce paramètre, tout d'abord, le ruissellement total (QTot) a été calculé en ajoutant différents composants de ruissellement. Les composants du ruissellement sont: le ruissellement des précipitations (RRo) et le débit de base (BF). Le ruissellement des précipitations est la somme du ruissellement de surface et du débit latéral de la première couche de sol (Terink et al., 2015). QTot est calculé selon:

$$Q_{Tot} = RRo + BF \quad (3)$$



Avec $QTot$ (mm) le ruissellement total, RRo (mm) le ruissellement des précipitations et BF (mm) le débit de base. Le débit de la rivière est calculé à l'aide des trois équations ci-dessous:

$$QTot_t^* = \frac{QTot_t \cdot A}{24 \cdot 3600} \quad (4)$$

$$Q_{accu,t} = \text{accuflux}(F_{dir}, QTot_t^*) \quad (5)$$

$$Q_{rout,t} = (1 - k_x) \cdot Q_{accu,t} + k_x \cdot Q_{rout,t-1} \quad (6)$$

avec $QTot_t^*$ ($m^3 \cdot s^{-1}$) le ruissellement spécifique le jour t , $QTot_t$ le ruissellement spécifique en mm le jour t , A (m^2) la surface de la cellule de la grille, $Q_{accu,t}$ ($m^3 \cdot s^{-1}$) le débit cumulé du cours d'eau le jour t sans prise en compte du retard d'écoulement, $Q_{rout,t}$ ($m^3 \cdot s^{-1}$) le débit à l'exutoire le jour t , $Q_{rout,t-1}$ ($m^3 \cdot s^{-1}$) le débit à l'exutoire $t - 1$, F_{dir} le réseau de direction du débit, et k_x (-) le coefficient de récession du débit (Terink et al., 2015). k_x a des valeurs comprises entre 0 et 1 (0 correspond à une réponse rapide et 1 correspond à un bassin à réponse lente) (Terink et al., 2015).

Le débit moyen annuel à l'exutoire simulé diminue avec l'augmentation du pourcentage d'arbres plantés (Figure 9). Ceci s'explique principalement par une diminution du ruissellement de surface liée à la plantation d'arbre. Nos résultats indiquent que sous une couverture d'eucalyptus de 50%, la valeur moyenne annuelle du débit à l'exutoire serait de 0.25 l/s. Les scénarios sous plantation d'Acacias, de Pins et de future projection montrent un débit annuel moyen proche des scénarios avec plantations d'Eucalyptus. Dans les scénarios de forêt naturelle, nous n'avons pas remarqué de changements significatifs du débit en fonction du pourcentage couvert par les arbres (0.50, 0.45 et 0.43 l/s pour une couverture de 10%, 30% et 50% respectivement). De même pour les scénarios de plantations d'agrumes (citrus) (0.47, 0.47 et 0.41 l/s pour une couverture de 10%, 30% et 50% respectivement). La valeur la plus élevée du débit à l'exutoire appartient au scénario de savanisation (5.97 l/s) à cause d'un ruissellement global beaucoup plus fort.

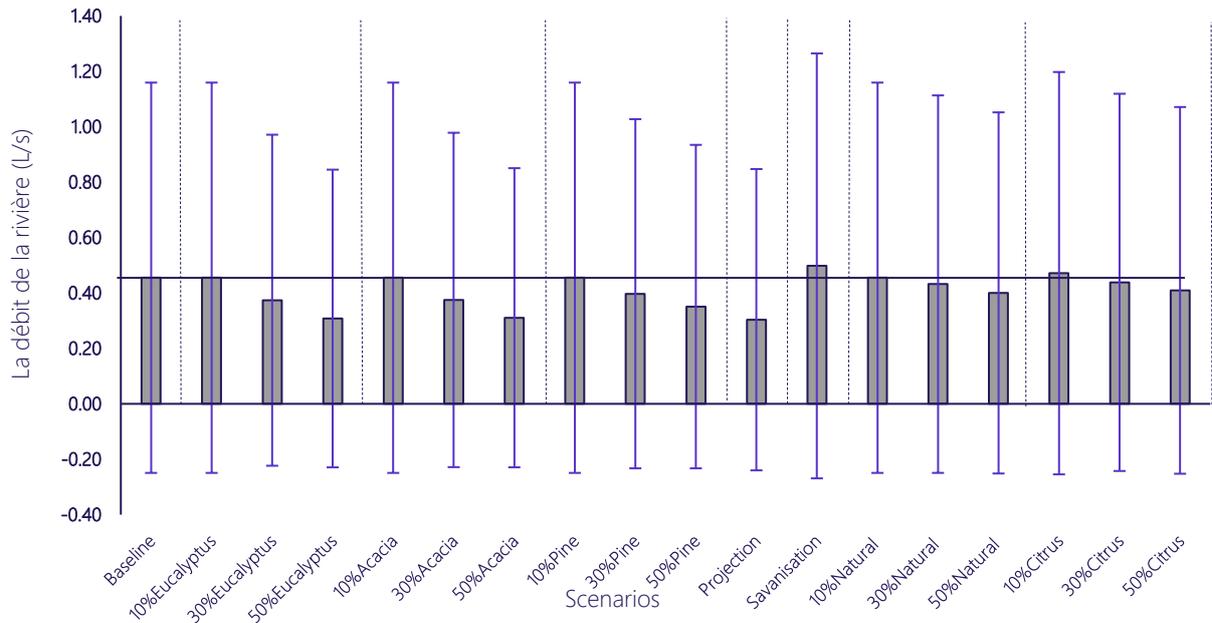


Figure 9 : Moyenne annuelle du débit des rivières (l/s)

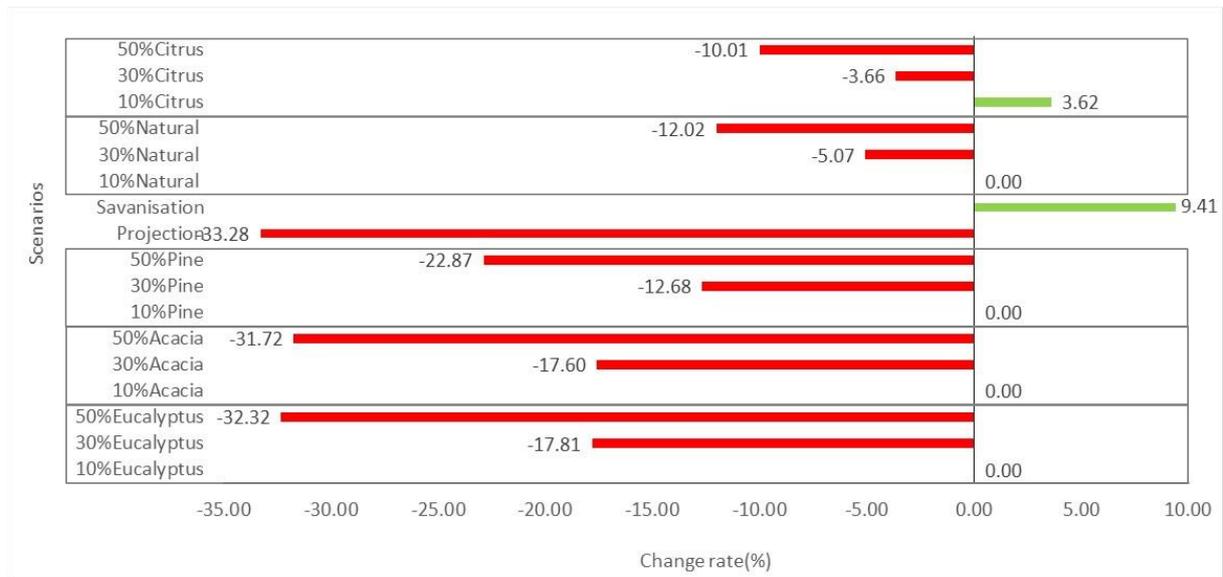


Figure 10 : Pourcentages de changement du débit moyen des rivières du bassin versant par rapport à l'occupation du sol initiale



7_Discussion

7.1. Impact général des plantations

Selon les simulations du modèle, les résultats montrent que les plantations d'arbres de tous types permettent d'augmenter la quantité d'eau dans toutes les couches du sol. Ainsi, avec les paramètres définis pour chaque plantation, la diminution du ruissellement et l'augmentation de l'infiltration dans le sol surpassent l'augmentation du prélèvement de l'eau par la végétation à travers la transpiration. Les bilans hydriques au niveau des couches du sol est donc positif ce qui peut favoriser les cultures non irriguées dans le bassin versant. En revanche, avec la diminution du ruissellement de surface et au sein du sol liée aux plantations, le modèle prévoit une diminution du débit des rivières. Ceci pourrait alors avoir un impact négatif sur l'irrigation des rizières et l'adduction en eau potable en limitant la quantité d'eau disponible. Ces changements peuvent être relativement élevés (jusqu'à 30% - Figure 10). La diminution du ruissellement associée aux plantations est conforme aux différentes études menées dans divers pays qui montrent que l'évapotranspiration par les espaces boisés utilise plus d'eau que la végétation à racines peu profondes et entraîne une réduction du ruissellement annuel, et de l'érosion, des bassins forestiers (Scott, 1999; Scott and Lesch, 1997; Prinsloo and Scott, 1999; Dye and Poulter, 1995 ; Scott, 2005; Salemi et al., 2012). En Afrique de l'Est, Guzha et al (2018) ont également rapporté que l'augmentation globale du couvert forestier entraîne une diminution des débits annuels et le ruissellement de surface de $13\% \pm 1,9\%$ et $25\% \pm 5\%$, respectivement mais que la perte de couvert arboré entraîne une augmentation des fortes crues, la forêt ne pouvant plus jouer son rôle d'éponge.

7.2. Impacts différenciés selon les espèces plantées

L'intensité des impacts modélisés varie selon les espèces d'arbres plantés. Par exemple, les simulations résultent d'une augmentation plus forte de la quantité d'eau dans le sol dans le cas de l'Eucalyptus par rapport à la forêt naturelle ou à la plantation d'agrumes pour les mêmes proportions. Ceci s'explique en partie par le paramètre de profondeur des racines en entrée du modèle. La profondeur des racines considérée dans cet exercice de modélisation est de 1200 mm pour l'Eucalyptus et de 700 mm pour la forêt naturelle par exemple (Tableau 2). Ainsi, l'épaisseur du sol prise en compte pour la première couche est plus importante dans le cas de l'Eucalyptus. Ceci explique bien les différences par rapport au Pin (Kc similaires) et à l'Acacia pour qui la profondeur de racine a été réglée plus faible (800 mm - Tableau 2) et le Kc (1.8 - Tableau 2) est en revanche plus fort, augmentant le prélèvement de l'eau. Cette augmentation de la teneur en eau du sol s'explique également par une diminution du ruissellement de surface et du débit latéral (le mouvement de l'eau sous les forces gravitationnelles parallèlement à la pente du terrain se produit lorsque la teneur en eau du sol dépasse la capacité au champ). D'une part, plus d'infiltration d'eau



par une racine profonde d'Eucalyptus, et d'autre part, plus de consommation d'eau par cette espèce d'arbre, conduisent à une diminution du ruissellement de surface et du flux latéral.

Dans les scénarios sous plantation d'Acacia, les résultats étaient proches des scénarios avec Eucalyptus, mais contrairement aux scénarios avec Eucalyptus, la valeur Kc de l'Acacia (1.8 - Tableau 2) entraîne une diminution du drainage latéral au sein du sol car il reste moins d'eau disponible suite au prélèvement pour la transpiration. Dans les scénarios sous plantation de Pin, les résultats montrent de faibles performances par rapport à l'Eucalyptus et l'Acacia. Les deux paramètres clés, Kc et la profondeur des racines ont une valeur inférieure à celle de deux autres arbres et, par conséquent, le bilan hydrique du sol sous la plantation de Pin a une valeur inférieure.

Dans le scénario de savanisation, la végétation à racines peu profondes avec un Kc faible diminue l'infiltration d'eau dans le sol. En conséquence, la plupart des précipitations reçues par les bassins versants se présentent dans ce cas sous forme de ruissellement de surface fort limitant la quantité d'eau pouvant s'infiltrer dans le sol.

De même, malgré une profondeur de racines similaires entre l'Eucalyptus et les agrumes (scénario citrus (1200 mm et 1100 mm respectivement - Tableau 2), les différences peuvent s'expliquer par le ruissellement. Avec un Kc (et donc un prélèvement) des agrumes plus faible² (0.7 pour citrus et 1.05 pour l'Eucalyptus - Tableau 2), on pourrait s'attendre à une augmentation du stockage d'eau dans le sol. Toutefois, ce moindre prélèvement entraîne, selon le fonctionnement du modèle, un ruissellement plus fort (14 mm et 16 mm en moyenne mensuelle pour 50% Eucalyptus et 50% citrus respectivement par exemple), et donc une infiltration dans le sol plus faible, lorsque le paramètre Kc est plus faible. Cela peut être également lié à une simulation d'une interception³ plus forte lorsque le Kc est fort, limitant la quantité d'eau arrivant au sol, le script du modèle considérerait qu'une transpiration plus forte serait liée à une canopée plus développée. Une moindre quantité d'eau arrivant au sol à cause de l'interception limiterait le ruissellement et donc favoriserait l'infiltration de l'eau. Ce dernier processus n'est pas présenté dans le manuel du modèle limitant l'interprétation de ces résultats.

Finalemnt, les valeurs de Kc et de profondeur des racines pour la forêt naturelle sont issues d'une bibliographie très limitée qui ne représente pas forcément toute la diversité des espèces présentes. L'interprétation de ces résultats est donc très limitée.

Les résultats des simulations sur le débit des rivières ont montré que les arbres avec des racines profondes et une demande en transpiration (fort Kc) élevée comme l'Eucalyptus entraînent une diminution du débit. Cela s'explique par le ruissellement qui diminue avec l'augmentation de la

² Un plus faible Kc entraîne une plus faible transpiration

³ L'interception est la quantité d'eau retenue dans le feuillage des arbres et n'atteignant pas le sol. Elle est évaporée dans l'atmosphère.



proportion d'arbres plantées et d'autant plus que le K_c de l'espèce plantée est élevé (comparer par exemple Eucalyptus – $K_c = 1.05$ et racine 1200 mm - et citrus – $K_c = 1$ et racines 1100 mm - Figure 9). De plus, une profondeur des racines plus élevée entraîne un prélèvement de l'eau sur une épaisseur de sol plus forte et explique une diminution du drainage latéral et donc une quantité d'eau plus faible dans les rivières. C'est ce qui explique que le bilan pour les rivières dans le cas du Pin ($K_c = 1$ et 700 mm de profondeur de racine - Tableau 2) est plus positif que dans le cas de l'Eucalyptus ($K_c = 1.05$ et 1200 mm de profondeur de racine - Tableau 2). Les résultats de ces simulations sont conformes aux études précédentes qui ont également montré qu'une augmentation des plantations d'arbres à croissance rapide comme l'Eucalyptus entraîne une diminution annuelle du ruissellement de surface et du débit des rivières (Stednick, 1996; Scott et Lesch, 1997; Brown et al., 2005 ; Zhou et al., 2002). D'autres études telles que celle de Smethurst et al (2015) ont, en revanche, montré que les plantations d'Eucalyptus n'ont pas d'effet significatif sur la réduction du ruissellement par rapport aux forêts indigènes du Brésil. Dans le scénario de savanisation, la végétation à racines peu profondes avec un K_c faible diminue l'infiltration d'eau dans le sol et la plupart des précipitations est ruisselée vers les rivières, entraînant toutefois une érosion du sol.

La comparaison des impacts entre les espèces doit être analysée avec précaution. En effet, elle dépend des paramètres d'entrée du modèle qui sont issus d'une bibliographie limitée et de processus simplifiés pour l'exercice de modélisation. Il n'est donc pas possible de conclure sur les espèces à favoriser avec ce travail. De plus, au-delà des impacts sur la ressource en eau, d'autres paramètres doivent être pris en compte tels que la biodiversité (favorisée par les espèces autochtones) et l'utilisation de la ressource ligneuse (préférence pour les espèces à croissance rapide) par les communautés.

7.3. Les limites de l'étude

Ce travail présente d'importantes limites qui mènent à prendre des précautions dans l'interprétation des résultats.

Premièrement, le dispositif expérimental installé sur le bassin versant de Soarano pour mesurer le ruissellement et l'érosion n'a pas pu être utilisé, comme prévu initialement, pour valider les résultats en raison (i) d'incertitudes sur les mesures de terrain et (ii) de forts écarts entre la surface du dispositif de terrain (12m²) et de la résolution des données du modèle (10x10m).

Par ailleurs, les valeurs en entrée utilisées pour différencier les espèces entre elles sont issues de différentes sources de la littérature et certains K_c ont été recalculés (voir paragraphe 10.1 en Annexe) à partir de mesures de transpiration effectuées avec différentes méthodes et dans différents contextes climatiques. Ainsi, l'interprétation de la comparaison entre les K_c et l'impact des espèces



est limitée. Il serait nécessaire d'obtenir des valeurs de transpiration localement pour les différentes espèces plantées pour affiner cette composante de l'étude. De plus, les profondeurs racinaires sont également sujettes à caution car il n'a pas été possible de mesurer, au niveau du bassin versant de Soarano, la profondeur des racines pour les différentes espèces à un même stade de maturité. *Particulièrement, les valeurs de K_c et de profondeur des racines pour la forêt naturelle sont issues d'une bibliographie très limitée qui ne représente pas forcément toute la diversité des espèces présentes. L'interprétation de ces résultats est donc très limitée.* Par ailleurs, toutes les données d'entrée utilisées, issue d'image satellites ou de base de données mondiale contiennent des incertitudes et des niveaux d'imprécisions intrinsèques.

Finalement, nous n'avons pas pu avoir accès à la description du calcul de certains processus au sein du modèle qui pourraient expliquer la différence entre les espèces, limitant également les interprétations des résultats.



8_ Conclusion

8.1. Conclusion générale

Malgré les limites identifiées ci-dessus, notre étude a mis en évidence les impacts potentiels de la plantation d'arbres exotiques sur le comportement hydrologique du bassin versant de Soarano. **Les simulations ont montré que la plantation d'arbres à croissance rapide pourrait permettre d'augmenter la teneur en eau du sol et de réduire le ruissellement. Cependant, en raison de leur forte consommation d'eau, ces plantations pourraient mener à une diminution du débit de la rivière ce qui aurait des conséquences l'adduction en eau potable et l'irrigation des cultures.** Cet impact potentiel permet de renouveler la mise en garde sur la plantation de ce type d'espèces à croissance rapide à proximité des sources. Cela peut contenir un risque pour l'alimentation en eau du bassin versant. En revanche, comme le présente Guzha et al. (2018), **cela pourrait permettre de limiter les crues et les risques d'inondation.** Il faut faire preuve de prudence lors de la planification de transferts à grande échelle de terres sous des plantations d'arbres à croissance rapide. Ce type de plantation doit être réalisé après une observation attentive des conditions climatiques de la zone (Bila et al., 2014). Par ailleurs, **l'impact sur la biodiversité doit également être pris en compte.** Il faut faire attention à ce que ces espèces ne remplacent pas les espèces autochtones ou empêche leur recolonisation du milieu. Finalement, en raison de bibliographie trop limitée pour les données d'entrée sur la forêt naturelle, ces résultats ne peuvent être interprétés.

8.2. Impacts potentiels opérationnels

D'un point de vue opérationnel, une couverture du bassin versant de Soarano de 50% d'Eucalyptus entraînerait, selon les résultats du modèle, une diminution de 30% du débit annuel à l'exutoire. D'après une autre étude sur le bassin versant, la quantité d'eau en sortie du barrage encore en fonction est de $732.2 \times 1000 \text{ m}^3/\text{an}$ et la quantité d'eau déviée pour l'irrigation des cultures serait de $596.6 \times 1000 \text{ m}^3/\text{an}$ alors que les besoins de prélèvement de la station de production d'eau de la JIRAMA sont de $219 \times 1000 \text{ m}^3/\text{an}$ (Jacquet, 2018). Une diminution de 30% du débit mènerait les sorties du barrage à $512 \times 1000 \text{ m}^3/\text{an}$ ce qui resterait suffisant pour les besoins de la JIRAMA. Toutefois, il s'agit du bilan annuel. Actuellement, la quantité d'eau en saison sèche ne permet pas de combler les besoins de la station (Jacquet, 2018). Ce problème pourrait être accentué par la plantation d'arbre à croissance rapide même si leur transpiration est limitée pendant cette période. En revanche, la plus forte infiltration de l'eau permise par ces plantations pourrait limiter les besoins des populations à travers les canaux de déviation, ces derniers constituant une variable d'ajustement pour l'alimentation en eau du barrage.



9_Bibliographie

1. Alemie, T.C, 2009. The effect of eucalyptus on crop productivity, and soil properties in Koga watershed, western Amhara region, Ethiopia. Masters of Professional Studies. Presented to the Faculty of the Graduate School of Cornell University
2. Allen, R.G, Pereira, L.S, Raes, D, Smith, M, 1998. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56, FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations
3. Almeida, A.C., Soares, J.V., Landsberg, J.J., Rezende, G.D., 2007. Growth and water balance of Eucalyptus grandis hybrid plantations in Brazil during a rotation for pulp production. For. Ecol. Manage. 251, 10–21. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.06.009>.
4. Bilal, H., Nisa, S., Ali, S.S., 2014. Effects of Exotic Eucalyptus Plantation on the Ground and Surface Water of District Malakand, Pakistan. International Journal of Innovation and Scientific Research.
5. Brown, A.E., Western, A.W., McMahon, T.A., Zhang, L., 2013. Impact of forest cover changes on annual streamflow and flow duration curves. J. Hydrol. 483, 39-50. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.12.031>.
6. Brown, A.E., Zhang, L., McMahon, T.A., Western, A.W., Vertessy, R.A., 2005. A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation. Journal of Hydrology 310 (1–4), 28–61.
7. Cienciala, E., Kucera, J., Malme, A., 2000. Tree sap flow and stand transpiration of two Acacia mangium plantations in Sabah, Borneo. Journal of Hydrology. 236, 109–120
8. Dye, P.J., Poulter, A.G., 1995. A field demonstration of the effect on streamflow of clearfelling invasive pine and wattle trees from a riparian zone. S. Afr. For. J. 173, 27–30, <http://dx.doi.org/10.1080/00382167.1995.9629687>.
9. Ferraza, S.F.B, Rodriguesb, C.B, Garcias, L.G, Alvaresc, C.A, Lima W.P, 2019. Effects of Eucalyptus plantations on streamflow in Brazil: Moving beyond the water use debate. Forest Ecology and Management. 45(3), 117-127.
10. Futurewater, 2018. Retrieved from <https://www.futurewater.eu/>
11. Ganzhorn, J.U., Lowry, P.P., Schatz, G.E., and Sommer, S., 2001. The biodiversity of Madagascar: one of the world's hottest hotspots on its way out. Oryx. 35(4), 346–348.
12. Garcia, L.G., Salemi, L.F., Lima, W.P. & Ferraz, S., 2018. Hydrological effects of forest plantation clear-cut on water availability: Consequences for downstream water users. Journal of Hydrology: Regional Studies 19, 17–24
13. Guzha, A.C., Rufino, M.C., Okoth, S., Jacobs, S., Nóbrega, R.L.B., 2018. Impacts of land use and land cover change on surface runoff, discharge and low flows: evidence from East Africa. J. Hydrol. Reg. Stud. 15, 49-67. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.11.005>.
14. Huber, A., Iroume, A., Bathurst, J., 2008. Effect of Pinus radiata plantations on water balance in Chile. Hydrological Processes 22 (1), 142–148.
15. Jacquet, C., 2018. Étude quantitative et qualitative de la ressource en eau du bassin de Soarano (Ambalavao). Rapport de stage. Programme Eaurizon.



16. Jaleta, D., Mbilinyi, B.P., Mahoo, H.F. et al. Effect of Eucalyptus expansion on surface runoff in the central highlands of Ethiopia. *Ecol Process* 6, 1 (2017). <https://doi.org/10.1186/s13717-017-0071-y>
17. Monteiro, E. B., Silva, A., Souza, A. P., Tanaka, A. A., Ferneda, B.G., Martim, C., 2016. Water requirements and crop coefficients of tropical forest seedlings in different shading conditions. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. 20(8), 709-715.
18. Prinsloo, F.W. and Scott, D.F., 1999. Streamflow responses to the clearing of alien invasive trees from riparian zones at three sites in the Western Cape Province. *Southern African Forestry Journal*. 185, 1-7.
19. Salemi, L.F., Groppo, J.D., Trevisan, R., de Moraes, J.M., de Paula Lima, W., Martinelli, L.A., 2012. Riparian vegetation and wateryield: a synthesis. *J. Hydrol.* 454–455, 195–202, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.05.061>.
20. Scott, D.F., 2005. On the hydrology of industrial timber plantations. *Hydrol. Process* 19, 4203-4206. <https://doi.org/10.1002/hyp.6104>.
21. Scott, D.F., Lesch, W., 1997. Streamflow responses to afforestation with eucalyptus grandis and Pinus patula and to felling in the mokobulaan experimental catchments, South Africa. *Journal of Hydrology* 199 (3–4), 360–377.
22. Terink, W., Lutz, A. F., Simons, G. W. H., Immerzeel, W. W., and Droogers, P., 2015. SPHY v2.0: Spatial Processes in Hydrology. *Geosci. Model Dev.*, 8, 2009–2034
23. Vieilledent, G., Grinand, C., Rakotomalala, F. A., Ranaivosoa, R., Rakotoarjaona, J.-R., Allnutt, T. F., and Achard, F. 2018. Combining global tree cover loss data with historical national forest-cover maps to look at six decades of deforestation and forest fragmentation in Madagascar. *Biological Conservation*. 222: 189-197.
24. Zhang, L., Zhao, F.F., Brown, A.E., 2012. Predicting effects of plantation expansion on streamflow regime for catchments in Australia. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 16, 2109-2121. <https://doi.org/10.5194/hess-16-2109-2012>.
25. Zhou, J., Liu, Y., Guo, H., He, D., 2014. Combining the SWAT model with sequential uncertainty fitting algorithm for streamflow prediction and uncertainty analysis for the Lake Dianchi Basin, China. *Hydrol. Process*. 28, 521–533.



10_ Annexes

10.1. Coefficient de culture (Kc)

Dans la méthode FAO, le coefficient de culture (Kc) est un coefficient utilisé pour calculer l'évapotranspiration potentielle pour les cultures poussant dans des conditions de fertilité et d'humidité du sol optimales et atteignant le plein potentiel de production, avec une simple multiplication de l'évapotranspiration de référence (ET₀) calculée avec l'équation de Penman-Monteith (Allen et al., 1998). Ce coefficient représente les effets intégrés des changements de la surface foliaire, de la hauteur de la plante, des caractéristiques de la culture, de la méthode d'irrigation, du taux de développement de la culture, de la date de plantation de la culture, du degré de couvert forestier, de la résistance de la canopée, des conditions du sol et du climat et des pratiques de gestion. Chaque culture aura un ensemble de coefficients de culture spécifiques et prédira une utilisation différente de l'eau pour différentes cultures pour différents stades de croissance (Encyclopedia of Ecology, 2019). Dans cette étude, la FAO-56 a été utilisée comme référence pour les valeurs de Kc. En raison de l'absence de valeurs Kc pour l'eucalyptus et l'acacia dans cette référence, elles ont été calculées directement par les valeurs d'évapotranspiration réelle (ET_a) trouvées dans la littérature (Almedia et al., 2007; Ferraz et al., 2019; Cienciala et al., 2000) et les valeurs d'ET₀ calculées pour le lieu et la période d'étude avec les données météorologiques disponibles. Pour le calcul de l'ET₀, les données météorologiques ont été obtenues à partir du jeu de données de *Climate Forecast System Reanalysis*' (CFSR, 2020) et l'évapotranspiration de référence (ET₀) a été calculée avec l'équation de Penman-Monteith. Kc est calculé comme suit (Allen et al., 1998):

$$ET_p = Kc \cdot ET_0 \quad (1)$$

L'évapotranspiration de référence (ET₀) est calculée avec l'équation de Penman-Monteith, selon (Allen et al., 1998):

$$ET_0 = \frac{0.408 \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \left(\frac{900}{T + 273} \right) \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 \cdot u_2)} \quad (2)$$

Avec R_n rayonnement net à la surface de la culture [MJ.m⁻².j⁻¹], G densité de flux thermique du sol [MJ.m⁻².j⁻¹], T température de l'air à 2 m de hauteur [°C], u₂ vitesse du vent à 2 m hauteur [m.s⁻¹], e_s pression de vapeur saturante [kPa], e_a pression de vapeur réelle [kPa], Δ courbe de pression de vapeur de pente [kPa.°C⁻¹], γ constante psychrométrique [kPa.°C⁻¹]. Le tableau 1 montre les valeurs de l'évapotranspiration réelle (ET_a) pour l'eucalyptus et l'acacia.



Tableau 6 : L'évapotranspiration réelle (ETa) de l'Eucalyptus et de l'Acacia dans la bibliographie utilisée

| Arbre | Pays | Région | espèces | Age (ans) | ETa (mm) | Références |
|------------|----------|---|---------|-----------|----------|-----------------------|
| Eucalyptus | Brazil | Brazil's Atlantic coast (19°051' S, 40°014' W) | grandis | 1-7 | 2.99 | Almedia et al(2007) |
| Eucalyptus | Brazil | PROMAB Experimental Catchments (23°02' S, 48°37' W) | grandis | 1-7 | 3.27 | Ferraz et al(2019) |
| Acacia | Malaysia | Foothills Mount Lumaku, (1158°E, 58°N) | mangium | 9.5 | 4.58 | Cienciala et al(2000) |

10.2. Configuration du modèle

10.2.1. Paramètres du bassin versant

La forme et l'orographie du bassin sont définies dans le cadre du bassin paramètres. Cinq cartes spatiales ont été sélectionnées pour définir le bassin de Soarano. Le tableau 3 donne un aperçu de ces cartes.

Tableau 7 : Cartes des paramètres du bassin

| Tab | Nom de Carte | Description | Méthode |
|--------------------|--------------|---|-------------|
| Parameters general | DEM | Modèle numérique de terrain. Définit l'élévation en mètres au-dessus de la mer pour chaque cellule. | Python |
| | Clone | Carte boolean utilisée comme modèle avec l'étendue et la résolution du modèle. Définit le bassin pour les cellules ayant la valeur True. | Python |
| | Slope | Définit la pente de chaque cellule, en fonction du MNT. | Python |
| | Locations | Carte nominale qui identifie les cellules avec des ID uniques comme location où la sortie de séries temporelles est requise. Une valeur nulle est considérée pour les cellules non-station. | QGIS/Python |
| | Catchment | Définit la limite du bassin et est utilisé pour calculer les flux du bassin. | Python |

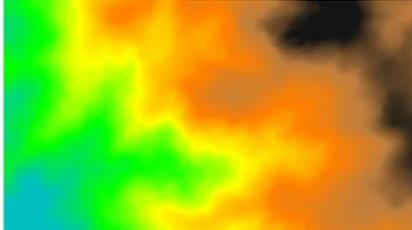


clone
■ nan
□ 1



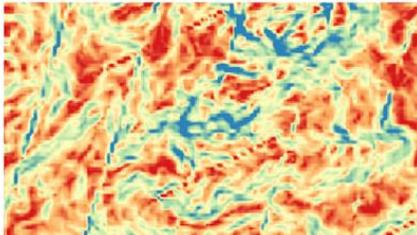
(a) Clone

dem
■ 1058.230000
■ 1159.376000
■ 1260.522000
■ 1361.668000
■ 1462.814000
■ 1563.960000



(b) DEM

slope
■ 0.059992
■ 0.199712
■ 0.339431
■ 0.479150
■ 0.618869



(c) Slope

catchment
■ 0
□ 1
● Outlet



(d) Catchment and outlet point

10.2.2. Paramètres du climat



10.2.3. Paramètres du sol

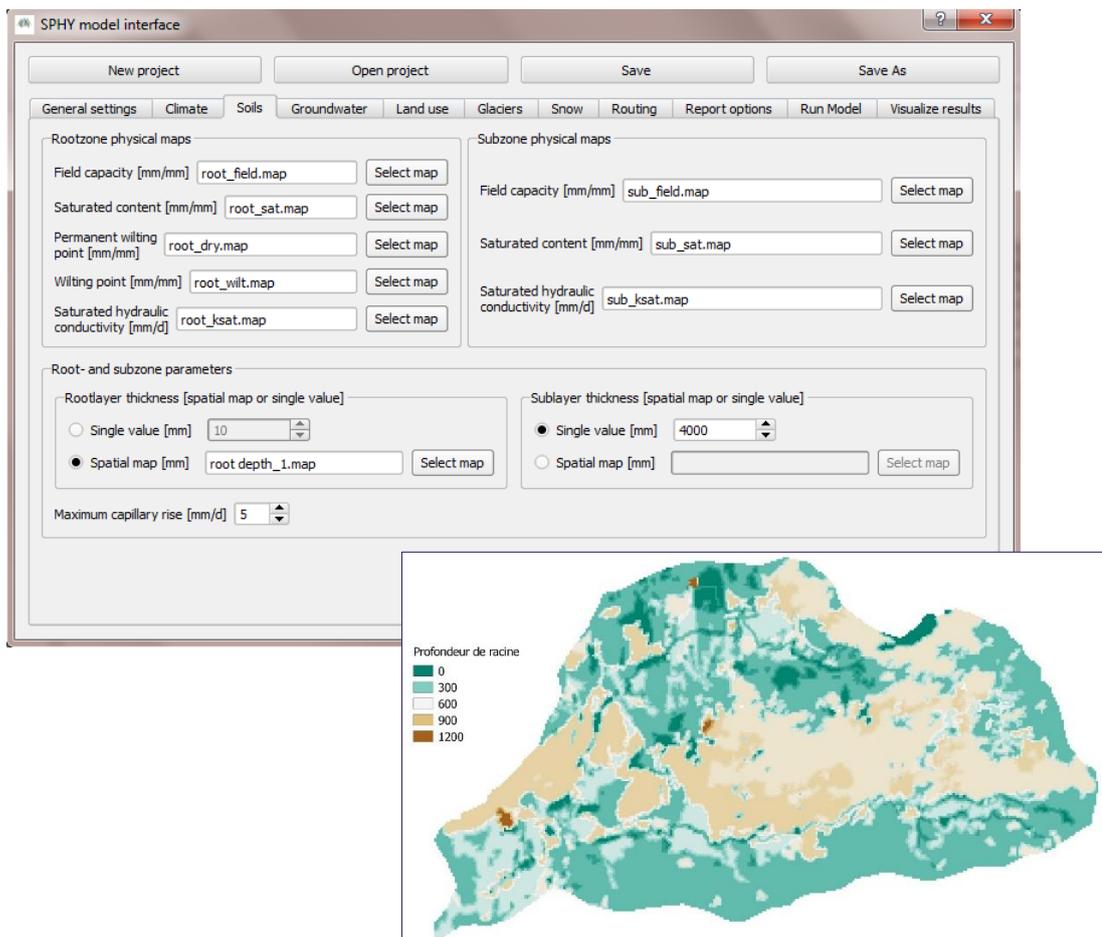


Figure 11 : Carte de profondeur des racines



10.2.4. Paramètres de l'occupation du sol

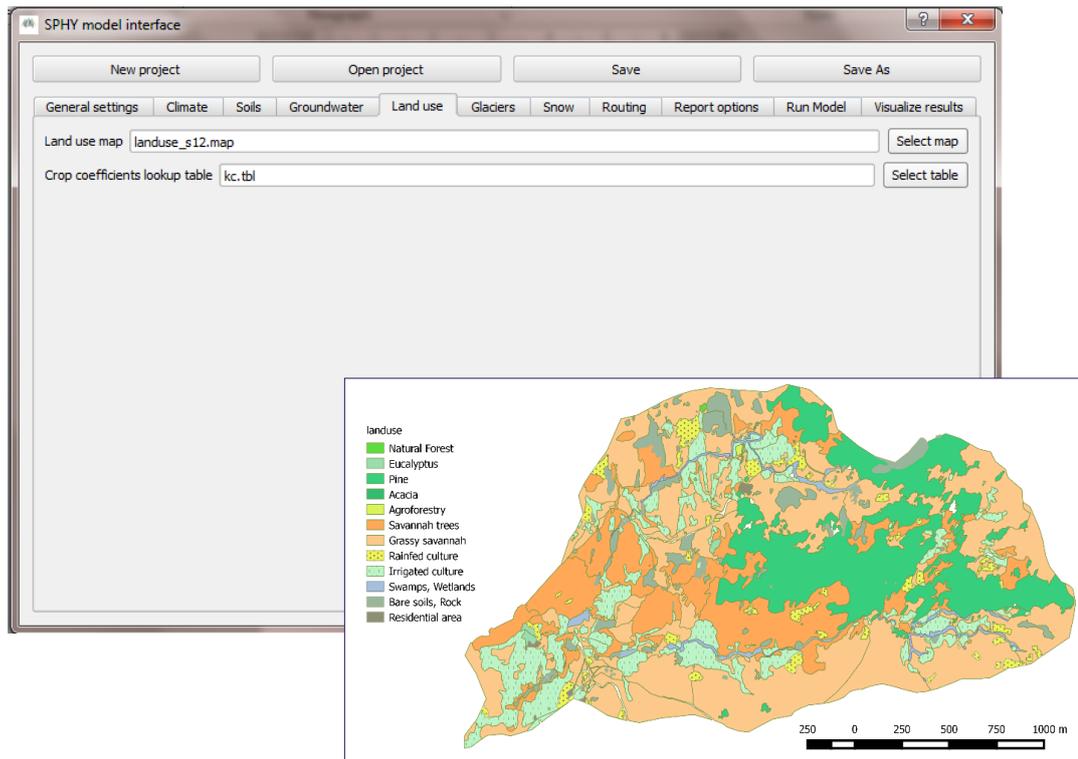


Figure 12 : Carte de l'occupation du sol

10.2.5. Les options du rapport et exécution du modèle

