



Avignon Université

MASTER SCIENCES ET TECHNOLOGIE DE L'AGRICULTURE, DE
L'ALIMENTATION ET DE L'ENVIRONNEMENT – HYDROGEOLOGIE, SOL ET
ENVIRONNEMENT (HSE)

Année universitaire 2023 – 2024

Xavier BROUSSE

Mémoire de stage

Modélisation de l'impact de la récupération des eaux pluviales sur le
fonctionnement hydrique de la recharge d'un aquifère au sein d'une parcelle
photovoltaïque



Stage au sein de l'entreprise Synerdev

En partenariat avec la Chair Agro Sys

Sous la Direction de Vincent Marc
Maître de conférences à l'Université d'Avignon

Je tiens à remercier grandement Monsieur Vincent Marc, responsable du Master 2 HSE.

Je le remercie pour l'enseignement complet et professionnalisant qu'il a su nous prodiguer tout au long de l'année ainsi que pour son écoute et ses conseils précieux.

Je remercie également Monsieur Thibault Bustos, référent agrivoltaïsme de la société Synerdev, qui a été mon tuteur de stage pendant 6 mois et m'a apporté un enseignement riche.

SOMMAIRE

I - Matériel expérimental : description et élaboration du système de récupération des eaux pluviales

A. Description des zones d'étude

1. Fonctionnement générale des centrales photovoltaïque
2. Critères d'implantation
3. Choix des centrales (localisation, pédologique, climato, hydro, type de culture)

B) Conception du prototype de récupération d'eau

1. Choix des matériaux
2. Modélisation 3D

C) Installation et utilisation de différents systèmes d'irrigation

1. Comment utiliser l'eau récupérée par le prototype
2. Solutions apportées pour irriguer les inter-rang
3. Réglementation : irrigation (culture) / élevage

D) Modèles mis en œuvre

1. Modèle de référence
2. Modèle Cropwat

II - Modélisation et exploitation des données

A) Présentation et modélisation

1. Modélisation de la récupération de l'eau pluviale
2. Estimation du prototype pour un besoin donné

B) Modélisation des flux hydriques via le logiciel Cropwat sur nos différents cas d'études

1. Modélisation de l'impact de la récupération d'eau à l'échelle annuelle sur le fonctionnement hydrique de la parcelle sur sol nu
2. Modélisation de l'impact de l'irrigation sur la culture présente dans l'inter-rang. (Avec irrigation / sans irrigation)
3. L'impact du prototype dans le cadre d'un climat futur à l'horizon 2050

C) Implémentation du volet irrigation au sein du prototype et du modèle, comparaison avec les données empiriques

1. Différentes solutions d'irrigation mises en œuvre ainsi que leurs intégrations aux modélisations
2. Comparaison des données empirique au données théoriques

III - Interprétation et discussions des résultats

A) Interprétation des résultats obtenus des différents scénarios

1. Comparaison des différents indicateurs hydrogéologique
2. Comparaison des différentes modélisations

B) Discussions

1. Impacte de la récupération d'eau de pluie sur la centrale
2. Intégration de la centrale dans un système hydrogéologique plus globale

C) Les limites

1. Limite du modèle
2. Conseils et pistes d'amélioration
3. Intégration du système de récupération des eaux dans les projets expérimentaux

INTRODUCTION

Le changement climatique, les émissions de CO₂, la surconsommation des ressources ; nouveaux maux de notre société demandent des réponses que le Marché seul n'est pas en capacité d'apporter.

Dans un contexte marqué par des bouleversements climatiques croissants, de nombreuses régions françaises, en particulier l'Occitanie, sont confrontées à des difficultés accrues pour irriguer les terres agricoles. Cette région, caractérisée par des conditions météorologiques de plus en plus variables, illustre les défis auxquels l'agriculture doit faire face pour maintenir la productivité malgré des ressources en eau de plus en plus limitées. Parallèlement à ces changements climatiques, la crise énergétique incite à accélérer la transition vers des sources d'énergie plus vertes et plus durables, telles que l'énergie photovoltaïque et l'éolien. Ces technologies offrent des solutions permettant de réduire les émissions de gaz à effet de serre et soutenant un avenir énergétique plus propre.

La société Synerdev est une entreprise qui développe des centrales photovoltaïques et des parcs éoliens. De ce fait, elle s'inscrit pleinement dans une démarche de production d'énergie durable.

Notre étude se concentre sur la mise en place d'un système innovant de récupération des eaux pluviales sur des centrales photovoltaïques, afin de concilier la production d'énergie avec la gestion durable des ressources hydriques.

Comment modéliser l'impact de la récupération des eaux pluviales sur les flux hydrologiques au sein d'une centrale photovoltaïque, à l'aide du logiciel Cropwat ?

Afin de répondre à cette problématique, notre démarche se structure autour de trois axes principaux.

La première partie est l'axe matériel expérimental, c'est-à-dire la conception du prototype où nous étudierons la conception et la mise en place d'un système de récupération des eaux pluviales, avec une description détaillée des équipements utilisés.

Deuxièmement, nous exposerons la modélisation et l'exploitation des données récupérées via le prototype où nous procéderons à une analyse des flux hydrologiques à partir des données collectées, en s'appuyant sur le logiciel Cropwat pour simuler l'impact du système sur la gestion de l'eau.

Enfin, nous terminerons par une interprétation et une discussion des résultats afin d'évaluer les performances du dispositif et émettre des critiques des résultats obtenus pour mieux comprendre les effets de l'installation à la fois sur la production énergétique et la gestion durable de l'eau.

Ce travail vise ainsi à proposer une solution intégrée, permettant de répondre aux enjeux climatiques et énergétiques actuels tout en optimisant l'utilisation des ressources en eau.

I - Matériel expérimental : description et élaboration du système de récupération des eaux pluviales

A. Description des zones d'étude

La première étape de l'installation du prototype précédemment évoqué est le choix de 2 centrales photovoltaïques qui pourront recevoir le projet.

1. Fonctionnement général des centrales photovoltaïques

Les centrales photovoltaïques sont des installations conçues pour produire de l'électricité verte en convertissant l'énergie solaire en énergie électrique.

Les centrales photovoltaïques fonctionnent grâce à des panneaux photovoltaïques qui se composent de plusieurs éléments :

- **Les onduleurs** convertissent le courant continu (CC) en courant alternatif (CA).
- **Les transformateurs** ajustent la tension de l'électricité pour permettre son injection dans le réseau.
- **Les systèmes de montage** soutiennent et orientent les panneaux solaires.
- **Les boîtiers de jonction** collectent et transmettent le courant produit par les panneaux.

La lumière du soleil est captée par les panneaux solaires, constitués de cellules photovoltaïques, dont l'élément principal est le silicium, un matériau semi-conducteur.

L'effet photovoltaïque permet de convertir l'énergie solaire en électricité : lorsque les électrons du silicium sont exposés à la lumière, ils sont excités, ce qui génère un courant électrique continu.

L'onduleur transforme ensuite ce courant continu en courant alternatif, compatible avec les appareils domestiques.

Enfin, le transformateur adapte la tension pour l'injection dans le réseau électrique local, permettant ainsi de distribuer l'électricité aux utilisateurs.

2. Critères d'implantation d'une centrale

Nous allons voir comment nous avons procédé à la sélection des centrales qui ont été choisies pour accueillir le projet de récupération d'eau.

Le respect d'un certain nombre de conditions sont nécessaires afin de choisir de manière optimale le lieu d'implantation d'une centrale. Ces critères permettent de sélectionner des sites optimaux pour l'installation et les tests de prototypes sur les centrales photovoltaïques de Tenergy, en garantissant à la fois la faisabilité technique et l'efficacité opérationnelle.

Nous limiterons notre propos aux centrales appartenant à Tenergy, seules exploitées par la société Synerdev.

Contraintes techniques :

- **Interstices réguliers entre les panneaux :** Les panneaux solaires doivent être installés avec des espaces réguliers, permettant une disposition homogène et efficace des prototypes.
- **Pieux réguliers pour la fixation des gouttières :** Les pieux doivent être régulièrement espacés et suffisamment solides pour fixer correctement les gouttières destinées à la récupération de l'eau.
- **Espace en bout de table pour l'installation des cuves :** Un espace adéquat doit être réservé à l'extrémité de chaque table photovoltaïque afin d'y installer les cuves de récupération d'eau, nécessaires pour le stockage et l'analyse des volumes collectés.

Pluviométrie :

Les sites doivent se situer dans des zones à **pluviométrie élevée**. Cela garantit des tests pertinents, même en cas de précipitations limitées, en maximisant les chances de succès des expérimentations.

Facilité d'accès :

Les sites doivent être accessibles facilement, en une journée de déplacement, facilitant les interventions techniques et le suivi du projet.

Détermination de la surface :

Une **surface minimale** doit être sélectionnée pour assurer la capture d'un volume d'eau significatif. Cela permet d'obtenir des résultats fiables, même en cas de faibles précipitations, et d'assurer la pertinence des données collectées.

3. Le choix des centrales



| Commune | Clarensac |
|---------------------------------|-------------------|
| Surface | 0,5 ha |
| Puissance | 4,4 MWC |
| Structure | EI-peux (4H 12) |
| Longueur (m) | 1,7 |
| Largeur (m) | 1 |
| Nombre de panneaux | 17700 |
| Inter-rang | 5 m |
| Angle (°) | 30 |
| Ecartement de l'interstice (cm) | 2 |
| Type de culture envisagé | Prairie / Céréale |



| Commune | Calmont |
|---------------------------------|------------------|
| Surface (Ha) | 25 |
| Puissance | 20,8 |
| Structure | 10v / 4 h |
| Longueur (m) | 2,74 |
| Largeur (m) | 1,134 |
| Nombre de panneaux | 57 880 |
| Inter rang (m) | 5 m |
| Angle (°) | 25 |
| Ecartement de l'interstice (cm) | 2 cm |
| Type de culture envisagé | Prairie / brebis |

Figure 1 : Implémentation des centrales et tableau récapitulatif de leurs structures

Les centrales qui ont été choisies sont celles de Clarensac et de Calmont.

Les tableaux indiquent les différentes caractéristiques, imputables à chacune, qui nous ont permis d'effectuer notre choix.

B) Conception du prototype de récupération d'eau

1. Choix des matériaux

Matériaux utilisés pour le prototype de récupération d'eau de pluie :

Il a été décidé que la collecte de l'eau de pluie sera effectuée au-dessus du dernier panneau photovoltaïque, afin de ne pas interférer avec les projets agricoles dans l'inter-rang. Cette

configuration permet également de fixer la gouttière sous le panneau, directement sur le support en fer qui le maintient. La récupération de l'eau est effectuée sur une surface équivalente à celle de trois panneaux.

La gouttière, chargée de collecter l'eau, est fixée sous les panneaux et prolongée jusqu'à l'extrémité de la table pour déverser l'eau dans une cuve de stockage. La cuve est placée de manière à permettre un remplissage gravitaire.

Gouttière de récupération :

- **Fonction principale** : La gouttière constitue l'élément clé du système de récupération d'eau de pluie. Elle est conçue pour capter l'eau s'écoulant des panneaux photovoltaïques.
- **Positionnement** : Elle sera installée sous les panneaux, précisément au niveau des interstices, pour optimiser la collecte de l'eau.

Types de gouttières :

- **Modèle compact** : Conçu pour une installation sous les panneaux avec une largeur réduite, facilitant une intégration efficace.

Cuve de récupération :

- **Fonction principale** : La cuve stocke l'eau récupérée par les gouttières.
- **Technologie de la cuve** : Elle peut être souple ou rigide, selon les contraintes du site et les conditions d'installation.
- **Contenance** : La capacité doit être suffisante pour stocker l'eau jusqu'à son utilisation, assurant une réserve adéquate.

Système de fixation de la gouttière :

- **Tiges et boulons** : Ce système permet de fixer solidement la gouttière au niveau des interstices entre les panneaux.
- **Attaches de gros diamètre sur pylône** : Des attaches robustes garantissent une fixation durable et stable sur les supports ou pylônes.
- **Système d'attache rapide** : Facile à installer et à ajuster, ce système ne nécessite pas d'outils spéciaux pour la maintenance.

Fonctionnement général :

- **Collecte de l'eau** : La gouttière, positionnée sous les panneaux photovoltaïques, capte l'eau de pluie.
- **Acheminement de l'eau** : L'eau collectée est acheminée via d'autres gouttières jusqu'à la cuve de récupération.
- **Stockage de l'eau** : L'eau est stockée dans la cuve, prête à être utilisée pour des tests ou d'autres applications.

2. Modélisation 3D

Afin de se rendre compte de l'esthétique et expliciter le projet, nous avons procédé à une modélisation 3D à l'aide du logiciel Twin Motion.

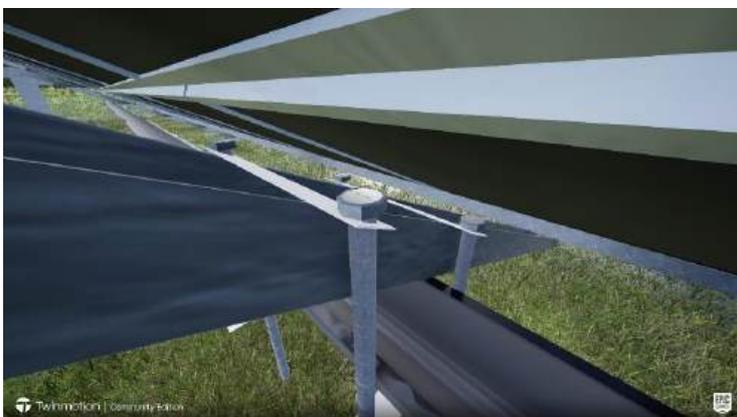


Figure 2 : Modélisation du prototype sous différents angles

C) Installation et utilisation de différents systèmes d'irrigation

1. Comment utiliser l'eau récupérée par le prototype

Utilisations potentielles de l'eau récupérée par le prototype :

L'eau collectée grâce au système de gouttières peut jouer un rôle essentiel dans le développement de projets agro-photovoltaïques (agri-PV), où l'agriculture et la production d'énergie solaire coexistent sur un même terrain. Voici les principales utilisations de cette eau :

- **Irrigation des cultures** : L'eau récupérée peut être utilisée pour irriguer les cultures situées dans les inter-rangs de la centrale photovoltaïque, favorisant ainsi la croissance des plantations sous et entre les panneaux solaires.
- **Adaptation aux conditions climatiques** : Le système peut être dimensionné en fonction des besoins en eau des cultures, en particulier durant les périodes de sécheresse, de plus en plus fréquentes. Cela permet une irrigation continue et fiable, aidant les cultures à prospérer malgré des conditions climatiques difficiles.

Abreuvement du bétail :

Une autre utilisation clé de l'eau récupérée est l'abreuvement du bétail, particulièrement dans les fermes photovoltaïques combinant élevage et production d'énergie. Les avantages sont nombreux :

- **Autonomie pour les éleveurs** : En utilisant l'eau collectée pour abreuver les animaux sur site, les éleveurs deviennent plus autonomes, réduisant leur dépendance vis-à-vis des sources d'eau externes.
- **Support en période sèche** : L'approvisionnement en eau pendant les périodes de sécheresse garantit le bien-être des animaux et le maintien des activités d'élevage, même en l'absence de précipitations suffisantes.

L'eau récupérée par les gouttières installées sous les panneaux solaires offre des solutions durables et innovantes pour l'irrigation des cultures et l'abreuvement du bétail. Cela contribue à une meilleure gestion des ressources en eau et au développement de projets agro-photovoltaïques efficaces et autonomes.

2. Solutions apportées pour irriguer les inter-rang

Système d'irrigation gravitaire :

L'irrigation gravitaire est une méthode traditionnelle qui utilise la force de gravité pour acheminer l'eau aux cultures. Elle présente plusieurs avantages :

- **Coût abordable** : Cette méthode nécessite peu d'équipements et d'infrastructures, ce qui la rend accessible et économique pour les agriculteurs.
- **Simplicité d'utilisation** : Facile à comprendre et à mettre en œuvre, elle ne requiert pas de compétences techniques avancées, permettant une adoption rapide par les agriculteurs.
- **Adaptabilité** : Elle peut être utilisée sur différents types de sols, de cultures et de topographies.
- **Efficacité** : L'irrigation gravitaire assure une répartition uniforme de l'eau sur l'ensemble du champ, garantissant une bonne hydratation des plantes.
- **Aucune consommation d'énergie** : Comme l'eau circule naturellement grâce à la gravité, il n'y a pas de besoin en électricité, ce qui réduit les coûts énergétiques.

Cependant, cette méthode présente aussi des inconvénients notables :

- **Faible efficacité en eau** : L'eau s'écoulant librement sur le terrain entraîne des pertes importantes par évaporation, infiltration ou ruissellement.
- **Manque de contrôle** : Il est difficile de réguler précisément la quantité d'eau distribuée, ce qui peut conduire à une sur irrigation dans certaines zones et à un manque d'eau dans d'autres.
- **Coût d'installation** : Bien que l'irrigation gravitaire soit économique à long terme, la mise en place d'un terrain plat et d'un réseau de canaux bien conçu peut-être coûteuse, tout comme son entretien.

Système d'irrigation goutte à goutte :

Avantages :

- **Économie d'eau** : Ce système offre une utilisation efficace de l'eau, en minimisant les pertes par évaporation grâce à une irrigation précise.
- **Optimisation de l'arrosage** : Il fournit directement l'eau aux racines des plantes sans mouiller les feuilles et les tiges, ce qui réduit les risques de maladies fongiques.
- **Flexibilité et personnalisation** : Le débit d'eau peut être ajusté en fonction des besoins des plantes et de leur stade de croissance.

Inconvénients :

- **Risque de bouchage** : Les goutteurs peuvent se boucher à cause de dépôts de calcaire ou d'impuretés, nécessitant l'utilisation d'une eau propre et un entretien régulier des filtres.

Irrigation par aspersion

Les systèmes d'aspersion utilisent des asperseurs rotatifs lents, à buse simple ou double, qui projettent l'eau en jets dans les airs, simulant une pluie sur une surface circulaire. Ces dispositifs sont disponibles en diverses configurations de débits, de dimensions de buses, et de pressions.

Avantages :

- **Distribution uniforme** : L'eau est répartie de manière homogène sur les cultures.
- **Couverture de grandes surfaces** : Ils permettent d'arroser des champs étendus.
- **Amélioration de la photosynthèse** : L'humidité sur les plantes peut favoriser leur activité photosynthétique.

Inconvénients :

- **Perte d'eau** : Une partie de l'eau est perdue par évaporation ou à cause du vent qui déplace les jets d'eau, réduisant ainsi l'efficacité du système.

3. La réglementation liée à l'irrigation (culture) et à l'élevage

En France, la réglementation de l'irrigation des cultures repose sur une réglementation principalement européenne dont nous allons dégager les axes fondamentaux à prendre en compte.

Recommandations pour la qualité de l'eau d'irrigation :

La qualité chimique de l'eau utilisée en irrigation est primordiale. Car elle influence à la fois la santé des plantes et l'efficacité du réseau d'irrigation, en particulier s'il est enterré.

Gestion de l'eau et plans de gestion :

- **SDAGE (Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux)¹** : Chaque bassin hydrographique est régi par un SDAGE, qui établit des orientations pour la gestion de l'eau sur une période de six ans. Ce schéma est élaboré par les comités de bassin.
- **SAGE (Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux)** : Le SAGE, à une échelle plus locale que le SDAGE, fixe des mesures spécifiques auxquelles les agriculteurs doivent souvent se conformer.
- **Restrictions de prélèvement** : Les autorisations de prélèvement peuvent être soumises à des restrictions, notamment en période de sécheresse. En cas de pénurie, des limitations peuvent être imposées.
- **Maintien des débits écologiques** : Les prélèvements d'eau ne doivent pas compromettre les débits écologiques des cours d'eau, essentiels à la préservation des écosystèmes aquatiques.

Qualité de l'eau pour l'élevage² :

- **Absence de norme sanitaire stricte** : Actuellement, il n'existe pas de normes spécifiques sur la qualité sanitaire de l'eau pour l'abreuvement des animaux. La réglementation européenne est imprécise à ce sujet et en France, des recommandations sont émises sans être contraignantes.
- **Qualité de l'eau** : L'eau distribuée aux animaux doit être propre et exempte de contaminants, notamment d'origine fécale. Elle doit être conservée dans des récipients propres pour éviter les risques de contamination.

Utilisation des eaux pluviales :

L'eau de pluie récupérée des toitures constitue une ressource précieuse, surtout avec la recrudescence d'épisodes pluvieux intenses. Toutefois, certaines précautions sont nécessaires :

- **Filtration** : À la sortie des gouttières, l'eau doit passer par un système de préfiltration (comme un filtre à panier) pour éliminer les débris grossiers (feuilles, branches, mousses).

¹ Directive 2000/60/CE du Parlement européen et du Conseil du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau

² Annexe 1

- **Stockage** : Une citerne enterrée en béton est recommandée pour éviter les fluctuations de température, qui peuvent favoriser le développement de micro-organismes. Le système doit inclure une aération, une trappe de visite et un trop-plein.
- **Traitement de l'eau** : L'eau de pluie n'est pas potable en l'état. Elle contient des métaux, des matières organiques, des micropolluants et des micro-organismes. Il est donc essentiel de la traiter avant utilisation.
- **Déversoir d'orage** : Il est recommandé de prévoir un déversoir d'orage pour éviter que l'eau collectée après une longue période de sécheresse ne surcharge la cuve, car elle est souvent chargée en poussières et autres éléments indésirables.

Ces recommandations assurent une gestion optimale de l'eau pour l'irrigation et l'élevage, tout en préservant la qualité des ressources disponibles.

D) Modèles mis en œuvre

1. Le modèle conceptuel de référence initial

Le premier modèle, schéma, a été conçu pour répondre aux différentes problématiques liées à la récupération d'eau sur une centrale photovoltaïque et à son utilisation ultérieure dans les inter-rangs de la centrale. La réflexion s'est concentrée sur l'impact de la récupération d'eau sur le fonctionnement hydrogéologique de la centrale, tout en permettant d'estimer les besoins en eau pour divers types d'élevages ou de cultures.

Le modèle conceptuel de base est structuré en plusieurs compartiments. Le premier bloc comprend la collecte de l'eau de pluie, le réservoir et la phase d'irrigation du projet. Le deuxième bloc concerne les cultures mises en place dans le cadre du projet. Ce bloc prend en compte différents flux d'eau entrants et sortants : les flux entrants incluent la pluie tombant sur les inter-rangs de la centrale et l'eau du système d'irrigation, tandis que les flux sortants incluent l'évapotranspiration et le ruissellement de l'eau. Ensuite, le modèle intègre les premiers horizons du sol jusqu'au substrat, avec deux flux : la percolation (flux entrant) et les remontées capillaires (flux sortant).

Chaque bloc est influencé par divers facteurs. Le premier, le bloc climatique, a un impact majeur sur le bloc « culture ». Les conditions climatiques varient selon les régions géographiques, affectant les types de cultures possibles, leur consommation en eau et leur transpiration. D'autres facteurs entrent également en jeu, influençant l'ensemble du modèle.

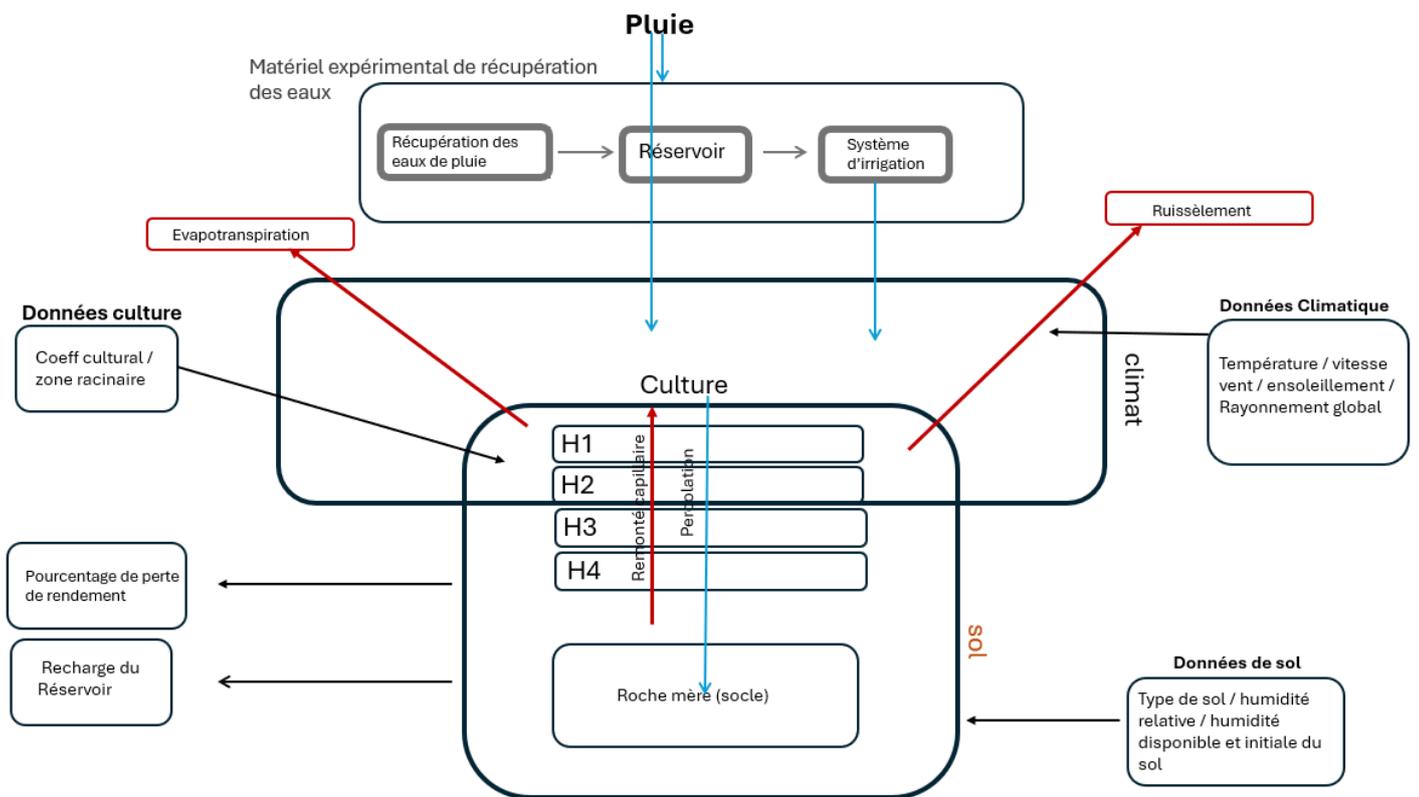


Figure 3 : Schéma conceptuel construit pour modéliser les différents cas d'études

Le premier schéma est le modèle conceptuel de base avec ce qui était souhaité pour étudier la récupération des eaux.

Ensuite, ayant constaté que le logiciel Crpwat intégrait de nombreuses conditions qui étaient nécessaires, nous avons intégré le logiciel au modèle conceptuel de base.

2. Le modèle construit via le logiciel Cropwat

Le modèle construit via le logiciel Cropwat est similaire au modèle idéal que nous souhaitons développer. Il se compose des mêmes blocs principaux : d'abord le matériel expérimental, puis le bloc "culture", avec une série d'informations en amont, telles que les données climatiques, les caractéristiques des cultures, et les propriétés des sols. Cropwat permet de recueillir des informations précieuses, telles que la quantité d'eau percolant dans le sol, contribuant à la

recharge des nappes phréatiques, ainsi que l'apport en eau de ces nappes. Il fournit également des calendriers d'irrigation spécifiques à chaque culture, en fonction du climat et du type de sol. En plus de ces informations, Cropwat fournit des données sur le stress hydrique, la capacité de rétention d'eau des sols, ainsi que sur les phénomènes comme l'évaporation et le ruissellement sur les surfaces considérées.

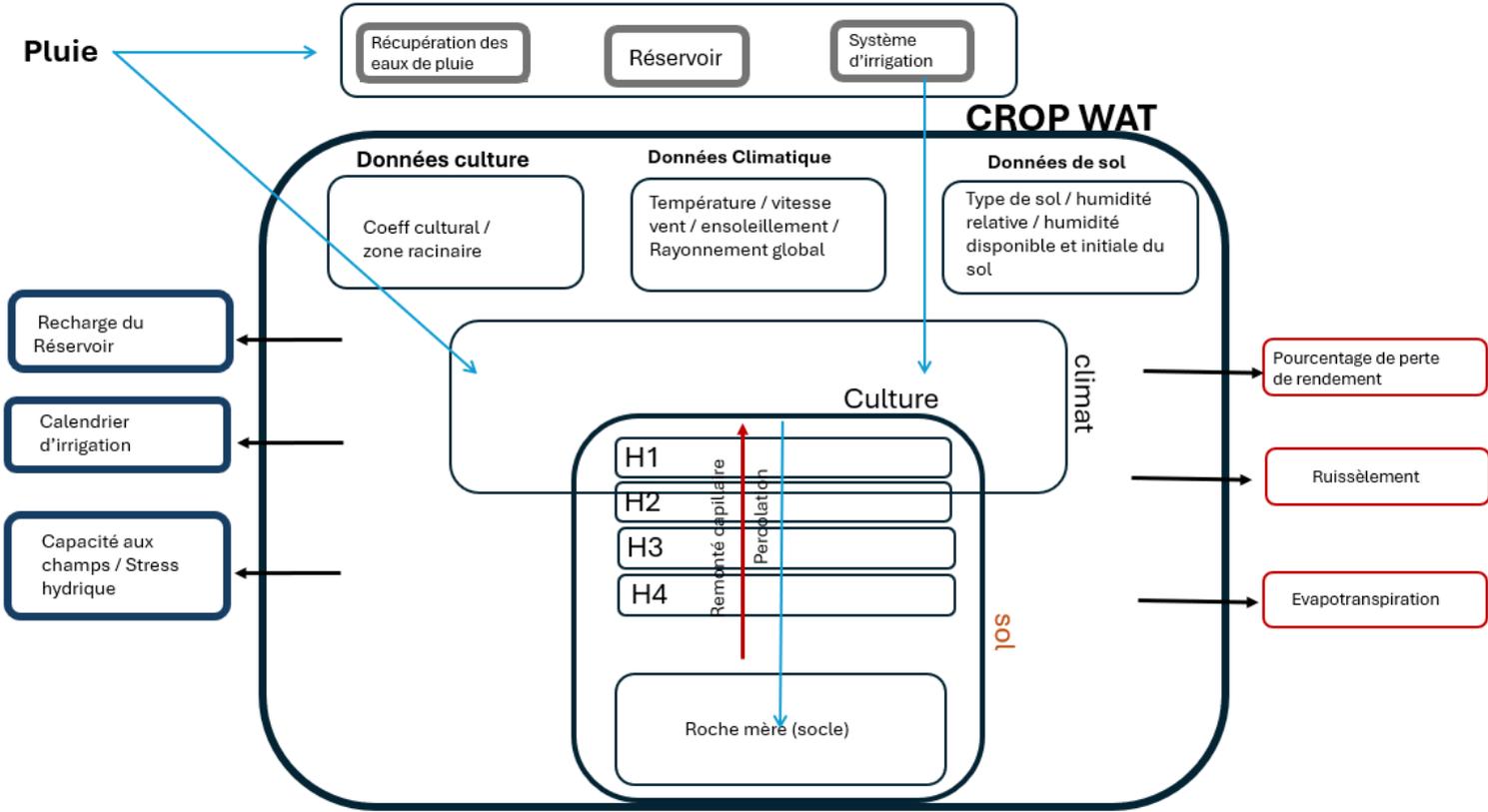


Figure 4 : Schéma conceptuel construit avec le logiciel cropwat pour réaliser les modélisations

II - Modélisation et exploitation des données

A) Présentation et modélisation

1. Modélisation de la récupération de l'eau pluviale

La modélisation de la récupération des eaux pluviales a été réalisée sur deux sites distincts. Le premier est situé dans la commune de Clarensac, près de la ville de Nîmes et le second dans la commune de Calmont, à environ vingt minutes de Toulouse.

Ces deux modélisations permettent de comparer deux types de centrales photovoltaïques ayant des caractéristiques distinctes, notamment en terme de surface de panneaux, de type de sol, et de conditions climatiques. Cette diversité est essentielle pour évaluer l'efficacité de la récupération d'eau dans des environnements variés.

Les données climatiques pour les deux sites ont été obtenues auprès de Météo France, tandis que les caractéristiques des sols ont été établies en fonction des valeurs de référence issues de la littérature scientifique.

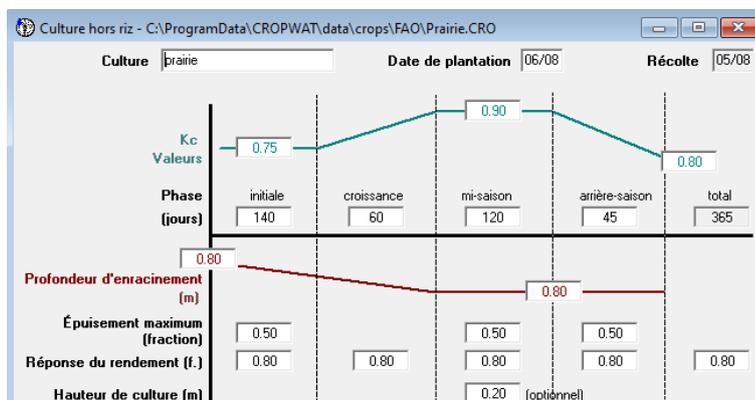
Données climatiques (Figure 5) :

| Mois | Temp Min °C | Temp Max °C | Humidité % | Vent m/s | Insolation heures | Ray. kJ/m²/jour | ETo mm/jour |
|-----------|----------------|----------------|---------------|-------------|----------------------|--------------------|----------------|
| Janvier | 2.4 | 10.3 | 74 | 3.8 | 4.6 | 6.5 | 1.20 |
| Février | 3.5 | 11.9 | 68 | 3.9 | 5.3 | 9.2 | 1.77 |
| Mars | 5.2 | 14.7 | 62 | 4.1 | 6.5 | 13.6 | 2.71 |
| Avril | 7.8 | 17.8 | 61 | 4.1 | 7.6 | 19.0 | 3.61 |
| Mai | 11.2 | 21.9 | 58 | 3.7 | 8.6 | 21.5 | 4.65 |
| Juin | 14.9 | 26.2 | 58 | 3.7 | 10.3 | 24.6 | 5.74 |
| Juillet | 17.7 | 29.8 | 54 | 3.8 | 11.4 | 25.6 | 6.72 |
| Août | 17.2 | 28.9 | 58 | 3.5 | 10.2 | 22.0 | 5.75 |
| Septembre | 14.7 | 25.3 | 70 | 3.3 | 7.9 | 16.1 | 3.79 |
| Octobre | 10.8 | 20.0 | 74 | 3.3 | 6.0 | 10.7 | 2.36 |
| Novembre | 5.9 | 14.1 | 76 | 3.5 | 4.8 | 7.0 | 1.44 |
| Décembre | 3.0 | 10.7 | 72 | 3.7 | 4.3 | 5.6 | 1.24 |
| Moyenne | 9.5 | 19.3 | 65 | 3.7 | 7.3 | 15.0 | 3.41 |

Données pluviométriques (Figure 6) :

| | Pluie mm | Pluie eff. mm |
|-----------|-------------|------------------|
| Janvier | 20.5 | 16.4 |
| Février | 23.2 | 18.6 |
| Mars | 16.7 | 13.4 |
| Avril | 5.0 | 4.0 |
| Mai | 83.1 | 66.5 |
| Juin | 78.7 | 63.0 |
| Juillet | 2.6 | 2.1 |
| Août | 20.4 | 16.3 |
| Septembre | 52.3 | 41.8 |
| Octobre | 119.7 | 95.8 |
| Novembre | 18.0 | 14.4 |
| Décembre | 23.1 | 18.5 |
| Total | 463.3 | 370.6 |

Données cultures (Figure 7) :



Données du sol (Figure 8) :

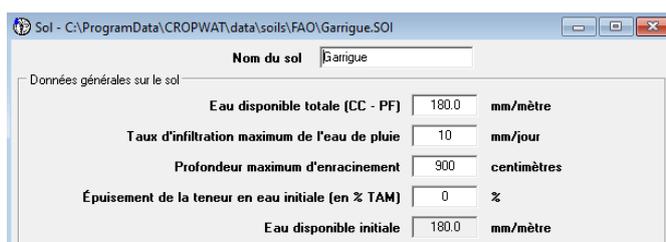


Figure 5,6,7 et 8 : Données nécessaire pour faire fonctionner le logiciel

2. Estimation du prototype pour un besoin donné

L'outil créé afin d'exprimer les besoins relatifs à l'installation du prototype est joint en annexe du présent³.

Il ressort que les besoins en eau et les paramètres de modélisation pour chaque site sont estimés en fonction des critères suivants :

- Pluviométrie (mm)
- Type de culture
- Nombre de panneaux sur la centrale
- Pertes (évaporation, ruissellement, etc.)

³ Annexe 2

- Dimensions des panneaux : Largeur (m) et Longueur (m)
- Surface d'un panneau (m²)
- Angle d'installation des panneaux (°)
- Surface projetée d'un panneau (m²)
- Longueur de gouttière pour un panneau
- Temps de modélisation (période d'étude)
- Besoins en eau selon CropWat (mm)
- Conversion des besoins en eau en m³ (pluie décomptée)
- Mètre cube d'eau tombé sur 1 hectare (m³)
- Surface considérée dans CropWat (ha)
- Surface dédiée à la culture sur la centrale

Si la centrale accueille des animaux :

- Nombre de jours de présence des bovins
- Besoins en eau par bovin (m³)
- Nombre de bovins présents
- Nombre de jours de présence des ovins
- Besoins en eau par ovin (m³)
- Nombre d'ovins présents

Volume d'eau récupéré et équipements :

- Volume d'eau récupéré par panneau (m³) dans la cuve
- Volume total d'eau tombé sur l'ensemble des panneaux (m³)
- Nombre de panneaux nécessaires pour répondre aux besoins en eau estimés (selon les résultats de CropWat)
- Longueur totale de gouttière à installer (m)
- Surface totale des panneaux à équiper (m²)
- Pourcentage d'eau récupérée par rapport au volume total tombant sur la centrale (%)
- Pourcentage d'eau tombant sur les panneaux récupérés par le prototype (%)
- Pourcentage de la centrale équipée pour la récupération d'eau (sur 1 ha) (%)
- Nombre de panneaux nécessaires pour irriguer la culture sur la centrale

Toutes ces données sont ensuite compilées et résumées dans un tableau récapitulatif, qui permet d'analyser l'efficacité du prototype de récupération d'eau en fonction des besoins en eau des cultures et/ou des animaux sur chaque site expérimental.

B) Modélisation des flux hydriques via le logiciel Cropwat sur nos différents cas d'études

1. Modélisation de l'impact de la récupération d'eau à l'échelle annuelle sur le fonctionnement hydrique de la parcelle sur sol nu

Dans cette situation, nous modélisons les deux cas d'étude au point zéro, c'est-à-dire sur un sol nu sans végétation, afin d'analyser uniquement le comportement hydrique de la parcelle. Cette modélisation permet d'évaluer la quantité d'eau qui percole dans le sol et celle qui ruisselle en surface, en prenant en compte les conditions climatiques spécifiques à chaque zone.

Zone de Clarensac :

- **Pluviométrie totale (mm) :** 463,3 mm
- **Pluie efficace (mm) :** 257,7 mm (quantité d'eau disponible pour le sol après évaporation et ruissellement)
- **Pertes totales de précipitation (mm) :** 207,1 mm (pertes dues à l'évaporation, ruissellement, etc.)

Zone de Calmont :

- **Pluviométrie totale (mm) :** 893,2 mm
- **Pluie efficace (mm) :** 203,4 mm
- **Pertes totales de précipitation (mm) :** 690,1 mm

Ces données révèlent des différences importantes entre les deux sites. Bien que la zone de Calmont reçoive presque le double de précipitations par rapport à Clarensac, les pertes d'eau sont bien plus élevées à Calmont. Cela peut s'expliquer par plusieurs facteurs, tels que le type de sol, l'intensité des pluies et la capacité d'infiltration. Le faible taux de pluie efficace à Calmont indique que seule une petite partie de l'eau est retenue par le sol, le reste étant perdu. Cette modélisation est utile pour estimer la disponibilité en eau et pour ajuster les systèmes de récupération et d'irrigation en fonction des besoins locaux.

2. Modélisation de l'impact de l'irrigation sur la culture présente dans l'inter-rang

Nous avons procédé à la modélisation de l'impact de l'eau tombant sur l'inter-rang de la centrale photovoltaïque, puis, dans une seconde étape, nous ajouterons les panneaux photovoltaïques au modèle.

Ensuite, nous avons effectué deux nouvelles modélisations : une sans apport d'irrigation et une, avec apport d'irrigation. La culture choisie pour cette analyse est une prairie annuelle.

Voici les étapes de la modélisation et les aspects étudiés :

Modélisation initiale :

- **Sans panneaux photovoltaïques** : A été analysé l'impact de l'eau de pluie sur l'inter-rang de la centrale, en examinant la quantité d'eau qui percole dans le sol et celle qui ruisselle en surface.

Modélisation avec panneaux photovoltaïques :

- **Avec panneaux photovoltaïques** : Les panneaux ont été intégrés dans le modèle pour évaluer l'impact de leur présence sur la répartition de l'eau. A été pris en compte la surface projetée des panneaux, leur angle d'inclinaison, et leur influence sur les flux d'eau.

Modélisation avec et sans apport d'irrigation :

- **Sans apport d'irrigation** : Nous avons observé l'effet des conditions climatiques et des caractéristiques du sol sur le développement de la prairie annuelle sans apport supplémentaire d'eau.
- **Avec apport d'irrigation** : Nous avons intégré les besoins en eau de la prairie annuelle en fonction des apports d'irrigation. Nous avons ensuite évalué l'impact de l'irrigation sur la croissance de la prairie, l'eau utilisée par les plantes, l'eau percolant vers la nappe phréatique et l'eau ruisselant sur la parcelle.

Dimensionnement du système de récupération des eaux de pluie :

- Nous avons utilisé les données obtenues pour estimer les besoins en irrigation et le dimensionnement d'un futur système de récupération des eaux de pluie. Ce qui comprend la capacité nécessaire du système de stockage et le volume d'eau que nous pouvons récupérer pour répondre aux besoins de la prairie annuelle.

Chaque étape a permis d'analyser les effets des différents paramètres sur le développement de la prairie, la gestion de l'eau sur la parcelle, et le dimensionnement du système de récupération, contribuant ainsi à une gestion plus efficace et durable de l'eau dans les centrales photovoltaïques.

Modélisation du site de Clarensac :

| Indicateur technique | | | | | | | | |
|----------------------|-------------------|----------------|-------------------------------------|-------------------------|--------------------------------------|------------------------------|---|--|
| Culture | Pluviométrie (mm) | Nombre de bête | Irrigation (mm) Abreuvement (mm) | Baisse de rendement (%) | Taux d'équipement de la centrale (%) | Nombre de panneaux à équiper | Pourcentage du volume d'eau récupéré par le prototype par rapport (%) | Pourcentage d'eau récupéré par rapport au volume d'eau tombant sur la centrale (%) |
| prairie | 463,3 | / | / | 45,7 | / | / | / | / |
| | 463,3 | / | 737 | 0 | 86,2 | 15265 | 88,99 | 21,15 |
| | 463,3 | / | 465 | 15,7 | 48,14 | 8521 | 58,15 | 11,8 |

| Modélisation des Culture | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|-------|-----------|------------------------------------|-----------------|--------------|---------------|------------------------------------|---------------------------------------|------------|----------------------|--------------------|------------------------|-------------|
| Culture | Pluie | Perte (%) | Besoin en eau optimal (mm) / (m3*) | Irrigation (mm) | Porosité (%) | Drainage mm/h | Taux d'infiltration Du sol (mm/ h) | Rétention en eau utile du sol en (mm) | Et0 (mm/j) | Stress Hydrique (mm) | Ruissellement (mm) | Profondeur du sol (cm) | Type de Sol |
| prairie | 463,3 | 45,7 | 0 | 0 | 35 à 45 | 36 | 10 | 0 à 72 | 3,41 | 70 à 140 | 0 | 20 à 40 | Garrigue |
| | 463 | 0 | 709,9 | 737 | 35 à 45 | 36 | 10 | 0 à 72 | 3,41 | 70 à 140 | 9,4 | 20 à 40 | Garrigue |
| | 463 | 15,7 | 697 | 460 | 35 à 45 | 36 | 10 | 0 à 72 | 3,41 | 70 à 140 | 0 | 20 à 40 | Garrigue |

Figure 9 : Modélisation de la zone d'étude de Clarensac via le logiciel Cropwat

Modélisation du site de Calmont :

| Modélisation des Culture | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|-------|-----------|------------------------------------|-----------------|--------------|---------------|------------------------------------|---------------------------------------|------------|----------------------|--------------------|------------------------|-------------|
| Culture | Pluie | Perte (%) | Besoin en eau optimal (mm) / (m3°) | Irrigation (mm) | Porosité (%) | Drainage mm/h | Taux d'infiltration Du sol (mm/ h) | Rétention en eau utile du sol en (mm) | Et0 (mm/j) | Stress Hydrique (mm) | Ruissellement (mm) | Profondeur du sol (cm) | Type de Sol |
| prairie | 590 | 15,2 | 289,2 | 0 | 35 à 50 | 10 à 80 | 30 | 0 à 72 | 2,40 | 70 à 140 | 169,8 | 20 à 40 | Fluvisol |
| | 590 | 0 | 289,8 | 298,3 | 35 à 50 | 10 à 80 | 30 | 0 à 72 | 2,40 | 70 à 140 | 243 | 20 à 40 | Fluvisol |
| | 590 | 8 | 298,4 | 100 | 35 à 50 | 10 à 80 | 30 | 0 à 72 | 2,40 | 70 à 140 | 179, | 20 à 40 | Fluvisol |

| Indicateur technique | | | | | | | | | |
|----------------------|-------------------|----------------|-------------------------------------|-------------------------|--------------------------------------|------------------------------|---|--|--|
| Culture | Pluviométrie (mm) | Nombre de bête | Irrigation (mm) Abreuvement (mm) | Baisse de rendement (%) | Taux d'équipement de la centrale (%) | Nombre de panneaux à équiper | Pourcentage du volume d'eau récupéré par le prototype par rapport (%) | Pourcentage d'eau récupéré par rapport au volume d'eau tombant sur la centrale (%) | |
| prairie | 590 | / | 0 | 15,2 | / | / | / | / | |
| | 590 | / | 100 | 8 | 2,37 | 1375 | 21 | 0,6 | |
| | 590 | | 298,1 | 0 | 7,09 | 4097 | 25,6 | 2,02 | |

Figure 10 : Modélisation de la zone d'étude de Calmont via le logiciel Cropwat

3. L'impact du prototype dans le cadre d'un climat futur à l'horizon 2050

Les émissions de Gaz à Effet de Serre (GES), qui s'accumulent dans l'atmosphère, contribuent fortement au réchauffement climatique. Selon le dernier rapport du GIEC, il est probable que la limite de + 1,5°C par rapport aux niveaux préindustriels sera dépassée d'ici 2035, avec la possibilité que cette limite soit franchie plus tôt en raison de la variabilité naturelle des phénomènes tels qu'El Niño.

L'augmentation des températures mondiales perturbera le cycle de l'eau, entraînant des fortes pluies plus fréquentes (comme les moussons) et des variations accrues entre périodes humides et sèches. Combinées aux vagues de chaleur, ces conditions favoriseront les incendies de forêt. Les tempêtes deviendront plus fréquentes partout dans le monde.

Dans les océans, le réchauffement climatique provoquera une élévation plus marquée du niveau des mers, due à la dilatation thermique des eaux et à la fonte des glaciers et des calottes polaires. Parallèlement, on observera une baisse du niveau d'oxygène et une augmentation de l'acidité

des eaux marines. Les puits naturels de carbone, tels que les forêts et les océans, verront leur capacité à absorber le CO₂ diminuer, exacerbant ainsi le changement climatique.



Figure 11 : Evolution du climat à l'horizon 2050

C) Implémentation du volet irrigation au sein du prototype et du modèle, comparaison avec les données empiriques

1. Différentes solutions d'irrigation mises en œuvre ainsi que leurs intégrations aux modélisations

Pour intégrer l'irrigation dans le prototype de récupération des eaux de pluie, il est important de considérer les différentes méthodes d'irrigation en fonction du volume d'eau récupéré, de la topographie du terrain et des contraintes liées au fonctionnement de la centrale (comme les lignes à haute tension enterrées).

Nous effectuerons une analyse des principales méthodes d'irrigation et leurs implications :

Méthodes d'irrigation :

- **Irrigation par aspersion** : Ce système distribue l'eau en l'air sous forme de gouttes, imitant la pluie naturelle. Il est adapté aux grandes surfaces comme les prairies.
- **Irrigation gravitaire** : Cette méthode utilise la gravité pour faire couler l'eau sur les cultures. Elle est simple mais nécessite une bonne gestion de la topographie pour une distribution uniforme.
- **Irrigation au goutte-à-goutte** : Ce système fournit de l'eau directement aux racines des plantes par des goutteurs. Il est efficace pour les cultures nécessitant un apport d'eau précis, comme les haies.

Considérations pour la mise en œuvre :

- **Volume d'eau récupéré**
- **Évaluation du volume** : Avant de choisir une méthode, il faut évaluer le volume d'eau récupéré par le prototype et déterminer si ce volume est suffisant pour les besoins de la culture choisie.

Topographie du terrain :

- **Adaptabilité** : La topographie du terrain influencera le choix de l'irrigation. Par exemple, l'irrigation gravitaire nécessite un terrain incliné pour la distribution de l'eau.

Contraintes liées à la centrale :

- **Lignes électriques** : Les lignes à haute tension enterrées imposent des contraintes pour l'installation de systèmes nécessitant des équipements électriques comme les systèmes d'aspersion ou de goutte-à-goutte.

Stratégies de gestion de l'eau :

Groupe 1 : Solutions nécessitant une alimentation électrique

Goutte-à-goutte :

- **Avantages** : Précision dans l'apport d'eau, économies d'eau, adapté aux haies et cultures nécessitant un apport précis.
- **Inconvénients** : Nécessite un système de pression et de filtration, complexité d'installation et de maintenance, gestion des canalisations pour centraliser les eaux récupérées.

Aspersion :

- **Avantages** : Bonne couverture des grandes surfaces comme les prairies, contrôle total du volume d'eau appliqué.
- **Inconvénients** : Nécessite un système de pression, installations plus complexes, gestion des canalisations et du maillage électrique souterrain.

Groupe 2 : Solutions sans alimentation électrique

Gravitaire :

- **Avantages** : Méthode simple et peu coûteuse, pas besoin d'alimentation électrique, adapté aux grandes surfaces avec une topographie favorable.

- **Inconvénients** : Volume d'eau plus important nécessaire, nécessite des réservoirs pour centraliser l'eau et assurer une distribution uniforme. Moins de contrôle sur l'apport d'eau comparé aux systèmes électriques.

Le choix de la méthode d'irrigation dépendra de plusieurs facteurs : le volume d'eau récupéré, la topographie du terrain, les contraintes liées à la centrale et les besoins spécifiques des cultures. Les systèmes nécessitant une alimentation électrique (goutte-à-goutte et aspersion) offrent un contrôle plus précis de l'apport d'eau mais impliquent une complexité accrue en termes d'installation et de gestion. Les systèmes gravitaires, bien qu'ayant des exigences en termes de volume d'eau plus élevés et de gestion de la distribution, offrent une solution plus simple et adaptée aux terrains avec une topographie favorable.

2. Comparaison des données empirique au données théoriques

Dans le tableau ci-dessous, nous comparons les données théoriques aux données collectées sur le terrain. Les données pluviométriques utilisées proviennent de la station de Nîmes Courbessac. Les volumes théoriques sont calculés en fonction de la surface d'installation et de récupération des eaux de pluie, soit 3 panneaux totalisant 5,1 m².

La méthode de collecte des données est la suivante : après chaque événement pluvieux, nous nous rendons sur le site pour vérifier le bon fonctionnement du prototype et recueillir des informations précieuses sur son opération et les points d'amélioration possibles.

Le tableau montre que nous avons pu enregistrer 7 événements pluvieux au cours des 4 mois d'installation. Il ressort de cette analyse que le pourcentage de collecte des eaux est globalement satisfaisant pour un prototype. En moyenne, la perte d'eau par événement est d'environ 10 à 15 %, avec un taux global de collecte de 86,7 % sur les 119 mm de pluie considérés. Cela indique une perte totale de 14,3 % sur l'ensemble des événements mesurés.

| Date | pluviométrie réelle en mm | surface captée | volume théorique dans la cuve (m3) | Volume théorique en litre | Volume réelle dans la cuve en litre | pourcentage de collecte d'eau de pluie |
|--------------|---------------------------|----------------|------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------|--|
| 23/05/2024 | 17,2 | 5,1 | 0,08772 | 87,72 | 75 | 85,49931601 |
| 28/05/2024 | 22,2 | 5,1 | 0,11322 | 113,22 | 95 | 83,90743685 |
| 08/06/2024 | 13 | 5,1 | 0,0663 | 66,3 | 56 | 84,46455505 |
| 17/06/2024 | 23,8 | 5,1 | 0,12138 | 121,38 | 106 | 87,32904927 |
| 21/06/2024 | 8 | 5,1 | 0,0408 | 40,8 | 35 | 85,78431373 |
| 06/07/2024 | 16,4 | 5,1 | 0,08364 | 83,64 | 77 | 92,06121473 |
| 12/07/2024 | 19 | 5,1 | 0,0969 | 96,9 | 85 | 87,71929825 |
| SOMME | 119,6 | | 0,60996 | 609,96 | 529 | 86,72699849 |

Figure 12 : Tableau montrant les volumes récupérés par le prototype au cours de son installation

III - Interprétation et discussions des résultats

A) Interprétation des résultats obtenus des différents scénarios

1. Comparaison des différents indicateurs hydrogéologiques

Les indicateurs hydrogéologiques des deux sites de modélisation sont récapitulés dans le tableau ci-dessous.

Site de Clarensac :

| Modélisation des Culture | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|-------|-----------|-----------------|--------------|---------------|------------------------------------|---------------------------------------|------------|----------------------|--------------------|------------------------|-------------|
| Culture | Pluie | Perte (%) | Irrigation (mm) | Porosité (%) | Drainage mm/h | Taux d'infiltration Du sol (mm/ h) | Rétention en eau utile du sol en (mm) | Et0 (mm/j) | Stress Hydrique (mm) | Ruissellement (mm) | Profondeur du sol (cm) | Type de Sol |
| prairie | 463,3 | 45,7 | 0 | 35 à 45 | 36 | 10 | 0 à 72 | 3,41 | 70 à 140 | 0 | 20 à 40 | Garrigue |
| | 463 | 0 | 737 | 35 à 45 | 36 | 10 | 0 à 72 | 3,41 | 70 à 140 | 9,4 | 20 à 40 | Garrigue |
| | 463 | 15,7 | 460 | 35 à 45 | 36 | 10 | 0 à 72 | 3,41 | 70 à 140 | 0 | 20 à 40 | Garrigue |

Figure 13 : Indicateurs hydrogéologiques sur la commune de Clarensac obtenus via le logiciel Cropwat

Site de Calmont :

| Modélisation des Culture | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|-------|-----------|-----------------|--------------|---------------|------------------------------------|---------------------------------------|------------|----------------------|--------------------|------------------------|-------------|
| Culture | Pluie | Perte (%) | Irrigation (mm) | Porosité (%) | Drainage mm/h | Taux d'infiltration Du sol (mm/ h) | Rétention en eau utile du sol en (mm) | Et0 (mm/j) | Stress Hydrique (mm) | Ruissellement (mm) | Profondeur du sol (cm) | Type de Sol |
| prairie | 590 | 15,2 | 0 | 35 à 50 | 10 à 80 | 30 | 0 à 72 | 2,40 | 70 à 140 | 169,8 | 20 à 40 | Fluvisol |
| | 590 | 0 | 298,3 | 35 à 50 | 10 à 80 | 30 | 0 à 72 | 2,40 | 70 à 140 | 243 | 20 à 40 | Fluvisol |
| | 590 | 8 | 100 | 35 à 50 | 10 à 80 | 30 | 0 à 72 | 2,40 | 70 à 140 | 179, | 20 à 40 | Fluvisol |

Figure 14 : Indicateurs hydrogéologiques sur la commune de Calmont obtenue via le logiciel Cropwat

2. Comparaison des différentes modélisations

Modélisations Réalisées :

- **Impact de la récupération d'eau sur sol nu** : Cette modélisation évalue la dynamique hydrique d'une parcelle sans végétation, uniquement en fonction des précipitations. Elle permet de mesurer la part d'eau captée par le sol, l'évaporation et le ruissellement.
- **Impact de l'irrigation sur la culture** : Cette modélisation examine l'effet de l'irrigation sur une culture présente dans l'inter-rang, en comparant les scénarios avec et sans irrigation.

Zone d'Étude de Clarensac :

- **Pluviométrie annuelle** : 463,3 mm
- **Modélisation sans panneaux** :
 - **Infiltration** : Environ 200 mm, soit près de la moitié de la pluviométrie annuelle.
 - **Ruissellement** : Relativement élevé, expliqué par un sol limoneux et argileux.
- **Modélisation avec panneaux** :
 - Sans irrigation : La perte de rendement est de 45,7 % pour la prairie.
 - Avec irrigation :

- **Scénario maximal** : Équipement de 87 % des panneaux, récupération de 21,15 % de l'eau totale tombée sur la parcelle, et 90 % de l'eau tombée sur les panneaux.
- **Scénario raisonnable** : Équipement de 48,14 % des panneaux, récupération de 11,8 % de l'eau totale tombée sur la parcelle.
- **Observations** : Pour Clarensac, la récupération d'eau nécessite un équipement étendu des panneaux pour maximiser la collecte. Un compromis raisonnable entre rendement de culture et volume d'eau récupéré est envisageable avec un équipement plus modéré.

Zone d'Étude de Calmont :

- **Pluviométrie annuelle** : Près de 600 mm
- **Modélisation sans panneaux : Infiltration** meilleure que Clarensac, avec une perte de 15,2 %, due à une pluviométrie plus élevée et des conditions climatiques plus favorables.
- **Modélisation avec panneaux** :
 - Avec irrigation :
 - **Scénario maximal** : Irrigation de 298,2 mm, ruissellement de 243 mm, avec un taux d'équipement de 7,09 % des panneaux.
 - **Scénario raisonnable** : Irrigation de 100 mm avec un taux d'équipement de 2,37 % des panneaux, récupérant seulement 0,6 % du volume total de pluie.
- **Observations** : La zone de Calmont, avec une pluviométrie plus élevée, montre un meilleur potentiel pour la récupération d'eau avec moins de panneaux nécessaires. Les conditions favorables réduisent les besoins en équipement pour atteindre un volume de récupération efficace.

Comparaison des Zones :

- **Clarensac** : Nécessite un équipement plus dense du prototype en raison de la pluviométrie plus faible. Le système doit être conçu pour pallier le déficit de précipitations en maximisant la collecte.
- **Calmont** : Les conditions climatiques et la pluviométrie plus élevées permettent une récupération plus efficace avec moins de panneaux. L'équipement du prototype est moins complexe et plus économique.

Les résultats des modélisations montrent des différences significatives entre les deux zones en termes de pluviométrie et de sol, influençant les besoins en équipement et la gestion de l'eau. Clarensac, avec une pluviométrie plus faible, nécessite une approche plus intensive pour maximiser la récupération d'eau, tandis que Calmont bénéficie de conditions plus favorables permettant une récupération plus efficace avec moins d'équipement.

B) Discussions

1. Impact de la récupération d'eau de pluie sur la centrale

Gestion de l'impact de la récupération d'eau sur les centrales photovoltaïques

Pour limiter l'impact de la récupération d'eau sur une centrale photovoltaïque et garantir que les effets sur la parcelle et le bassin versant restent minimales, plusieurs mesures ont été mises en place :

Équipement Limité à 50 % des Panneaux :

- **Objectif** : Minimiser les perturbations sur le système de captation d'eau tout en maximisant l'efficacité du prototype.
- **Approche** : Équiper un maximum de 50 % des panneaux photovoltaïques pour la collecte d'eau, permettant à l'eau de s'écouler librement sur la moitié restante des panneaux. Cette approche équilibre la collecte et le drainage naturel.

Limitation de la récupération d'eau à 60 % des précipitations tombant sur les panneaux :

- **Objectif** : Éviter une collecte excessive d'eau qui pourrait perturber le cycle naturel de l'eau et la fonction des panneaux.
- **Approche** : La récupération est limitée à 60 % de l'eau tombant sur les panneaux, ce qui laisse 40 % pour s'écouler naturellement et diminuer les effets sur le sol et l'écosystème environnant.

Limitation de la récupération à 15 % du volume total de pluie sur la centrale :

- **Objectif** : Assurer que la récupération d'eau ne perturbe pas de manière significative le cycle hydrologique global du bassin versant.

- **Approche** : La collecte d'eau est limitée à 15 % du volume total de pluie tombant sur l'ensemble de la centrale, permettant de laisser 85 % de l'eau dans le cycle hydrologique pour maintenir un équilibre écologique et hydrologique.

Synthèse et impact :

- **Équilibre écologique** : Ces mesures visent à réduire l'impact environnemental de la récupération d'eau en veillant à ce que l'eau captée soit bien gérée tout en permettant au reste de s'écouler naturellement. Cela aide à maintenir la santé des sols, des écosystèmes locaux et des bassins versants.
- **Gestion hydrologique** : En limitant la récupération d'eau à un pourcentage spécifique du volume total, ces mesures permettent de préserver les processus hydrologiques naturels, évitant une perturbation excessive du cycle de l'eau.
- **Adaptabilité du prototype** : Ces restrictions garantissent que le prototype de récupération d'eau est efficace tout en restant respectueux de l'environnement. Elles permettent également d'ajuster les pratiques en fonction des conditions locales et des besoins spécifiques de chaque site.

En appliquant ces mesures, l'objectif est d'optimiser la collecte d'eau tout en minimisant l'impact sur l'environnement et en garantissant la durabilité des systèmes de gestion de l'eau dans les centrales photovoltaïques.

2. Intégration de la centrale dans un système hydrogéologique global

L'intégration d'une centrale photovoltaïque dans un système hydrogéologique global est cruciale afin d'évaluer et de comprendre les impacts potentiels sur le bassin versant à une échelle plus large.

Nous analyserons comment ces impacts peuvent être abordés et atténués :

Évaluation des impacts hydrologiques :

- **Prélèvement d'eau** : Le fait de limiter le prélèvement d'eau à des volumes raisonnables (50 % des panneaux équipés, 60 % de l'eau tombant sur les panneaux, et 15 % du volume total de pluie sur la centrale), permet de minimiser les perturbations sur le cycle hydrologique global et on préserve les flux naturels d'eau.

- **Collecte et stockage** : La collecte de l'eau de pluie et son stockage doivent être conçus pour ne pas altérer les débits de ruissellement naturels. Les systèmes de collecte doivent inclure des dispositifs pour éviter la surcharge et le débordement, surtout lors des événements pluvieux intenses.

Choix des cultures et modes d'utilisation :

- **Compatibilité avec le climat** : La sélection des cultures doit prendre en compte les conditions climatiques locales. Les cultures doivent être adaptées à la pluviométrie et aux besoins en eau spécifiques de chaque zone pour optimiser leur croissance tout en minimisant la demande supplémentaire en irrigation.
- **Utilisation des ressources en eau** : Les modes d'utilisation des ressources en eau doivent être compatibles avec les spécificités géographiques. Par exemple, des pratiques telles que l'irrigation au goutte-à-goutte ou l'irrigation gravitaire doivent être choisies en fonction de l'efficacité de l'eau disponible et des besoins spécifiques des cultures.

Gestion des flux d'eau :

- **Évacuation et drainage** : Les systèmes de drainage doivent être conçus pour gérer l'excès d'eau sans entraîner de ruissellement excessif ou de risques d'érosion. L'intégration de dispositifs de préfiltration et de stockage adéquat est essentielle pour gérer les flux d'eau de manière durable.
- **Impact sur les écosystèmes locaux** : L'impact sur les écosystèmes locaux, y compris les zones humides et les habitats aquatiques, doit être évalué. Les pratiques de gestion doivent minimiser les perturbations sur ces écosystèmes et préserver leur fonctionnalité écologique.

Suivi et adaptation :

- **Surveillance continue** : La surveillance régulière des effets hydrologiques, de la qualité de l'eau et de la performance des systèmes de collecte et d'irrigation est essentielle pour ajuster les pratiques et garantir qu'elles restent en adéquation avec les objectifs environnementaux.
- **Adaptation aux changements climatiques** : Les stratégies doivent être flexibles et adaptables aux variations climatiques. Les modèles hydrologiques doivent être régulièrement mis à jour pour refléter les changements dans les précipitations et les conditions climatiques.

L'intégration d'une centrale photovoltaïque dans le système hydrogéologique global nécessite une approche équilibrée et réfléchie pour gérer les impacts sur le bassin versant. En mettant en œuvre des mesures de gestion adaptées et en choisissant des cultures compatibles avec le climat local, il est possible de maximiser les avantages des installations photovoltaïques tout en préservant l'équilibre hydrologique et écologique.

C) Les limites

1. Limite du modèle

Le modèle CropWat est un outil puissant pour la gestion de l'irrigation, des cultures, et des sols, mais il présente certaines limites lorsqu'il est utilisé pour modéliser des systèmes complexes tels que des centrales photovoltaïques intégrées à des projets de gestion de l'eau.

Nous analyserons ci-après les principales limites identifiées.

Absence de modélisation directe des panneaux solaires :

- **Problème** : CropWat ne prend pas en compte les aspects spécifiques des centrales photovoltaïques, tels que la configuration des panneaux, l'ombrage qu'ils créent, et leur impact direct sur la gestion de l'eau.
- **Conséquence** : Il est nécessaire de réaliser des modélisations successives et des adaptations pour simuler correctement l'impact des panneaux solaires sur la récupération d'eau, ce qui peut introduire des approximations dans les résultats.

Données générales sur le sol :

- **Problème** : CropWat utilise des données générales sur le sol et ne permet pas une spécification détaillée des premiers horizons du sol à différentes échelles.
- **Conséquence** : Cette limitation peut réduire la précision de la modélisation, surtout dans les contextes où les caractéristiques du sol varient considérablement à travers une parcelle.

Modélisation de la récupération d'eau :

- **Problème** : CropWat ne permet pas de modéliser directement les systèmes de récupération d'eau associés aux panneaux photovoltaïques.
- **Conséquence** : Un outil annexe est nécessaire pour gérer cet aspect, ce qui complique l'intégration et l'analyse globale. Les données sur la récupération d'eau doivent être traitées séparément, ce qui peut entraîner une perte de cohérence entre les modèles et les résultats obtenus.

Adaptabilité du modèle :

- **Problème** : Bien que CropWat puisse être adapté pour différentes situations, l'ajustement aux conditions spécifiques d'un site, comme la présence de panneaux photovoltaïques, peut nécessiter des ajustements importants.
- **Conséquence** : Les résultats peuvent ne pas refléter fidèlement les conditions réelles si les ajustements ne sont pas correctement réalisés, entraînant des erreurs dans l'évaluation des besoins en eau et des impacts environnementaux.

Ainsi, le modèle CropWat, tout en étant efficace pour la gestion de l'eau et des cultures, présente des limites significatives lorsqu'il est utilisé pour modéliser des centrales photovoltaïques et leurs impacts sur la gestion de l'eau. Les principales limites incluent l'absence de modélisation directe des panneaux solaires, les restrictions sur les données du sol et la nécessité d'outils annexes pour gérer la récupération d'eau. Ces limitations soulignent la nécessité d'adapter les méthodes de modélisation et d'intégrer des outils complémentaires pour obtenir une évaluation plus précise et complète des systèmes intégrant des panneaux photovoltaïques.

2. Conseils et pistes d'amélioration

Perturbation minimale de la centrale photovoltaïque :

- **Objectif** : Garantir que l'installation du prototype n'affecte ni la performance ni la structure de la centrale existante.
- **Approche** : Concevoir des systèmes de montage et de fixation qui n'endommagent pas les panneaux photovoltaïques ni les structures support. Utiliser des matériaux de fixation non invasifs.

Matériaux et conception :

- **Objectif** : Utiliser des matériaux durables, légers et faciles à installer sans compromettre la qualité de l'installation.
- **Approche** : Sélectionner des matériaux résistants aux intempéries et faciles à manipuler, en privilégiant ceux qui ne nécessitent pas de modifications majeures de la centrale.

Efficacité du prototype :

- **Objectif** : Améliorer l'efficacité de la collecte et du stockage de l'eau tout en minimisant les pertes.
- **Approche** : Optimiser la conception pour maximiser la collecte d'eau tout en minimisant le risque de débordement ou de perte.

Maintenance et durabilité :

- **Objectif** : Assurer que le prototype est facile à entretenir et durable dans le temps.
- **Approche** : Concevoir un système qui nécessite peu d'entretien et qui résiste aux conditions climatiques extrêmes.

Non-dégradation du milieu :

- **Objectif** : Veiller à ce que le prototype ne cause pas de dégradations environnementales.
- **Approche** : Utiliser des matériaux et des techniques qui n'affectent pas les sols ou les écosystèmes locaux. Assurer que le prototype est en harmonie avec l'environnement.

Impact écologique à long terme :

- **Objectif** : Éviter que le système de récupération d'eau ne crée des problèmes à long terme.
- **Approche** : Concevoir le prototype pour être adaptable aux futurs changements climatiques et à l'évolution des besoins agricoles. Assurer que le système ne crée pas de dépendance excessive aux ressources en eau ou ne perturbe pas les cycles naturels.

Adaptabilité aux cultures futures :

- **Objectif** : Assurer que le prototype est flexible et peut s'adapter à différents types de cultures et de conditions climatiques futures.

- **Approche** : Intégrer des caractéristiques modulaires dans la conception du prototype pour permettre des ajustements en fonction des nouvelles exigences des cultures ou des conditions environnementales changeantes.

Équilibre entre récupération et cycle hydrologique :

- **Objectif** : Maintenir l'équilibre du cycle hydrologique local tout en optimisant la récupération d'eau.
- **Approche** : Respecter les limites de prélèvement d'eau et veiller à ce que le système ne perturbe pas les flux naturels d'eau et la recharge des nappes phréatiques.

Les points d'amélioration identifiés pour le prototype mettent en lumière l'importance de la conception technique et éthique dans la mise en œuvre de systèmes de récupération d'eau. L'accent sur la non-perturbation des installations existantes, le choix des matériaux adaptés, ainsi que la considération des impacts environnementaux et écologiques à long terme sont cruciaux pour le succès et la durabilité du projet. Ces ajustements garantiront que le prototype reste efficace, durable, et respectueux de l'environnement tout en répondant aux besoins des cultures et en s'adaptant aux défis futurs.

3. Intégration du système de récupération des eaux dans les projets expérimentaux

Adaptabilité du prototype :

Le prototype de récupération des eaux, bien qu'optimisé pour les centrales photovoltaïques, peut également être adapté à d'autres types de projets, tels que l'élevage de chevaux ou d'autres types de cultures.

Nous exposerons ci-après comment il peut être intégré au travers des considérations à prendre en compte lors de son intégration.

Conditions favorables à l'implémentation :

Pour assurer le succès du système de récupération des eaux dans différents projets expérimentaux, certaines conditions doivent être réunies :

Climatologie et pluviométrie :

- **Considérations** : Le prototype est plus efficace dans des zones avec une pluviométrie adéquate pour justifier l'investissement dans la récupération des eaux. Il est crucial de choisir des sites où les précipitations sont suffisantes pour que la récupération d'eau soit économiquement viable.

Topographie et configuration du site :

- **Considérations** : Le terrain doit permettre une collecte efficace des eaux de pluie, en tenant compte des pentes, de la surface disponible, et des obstacles éventuels comme les lignes électriques ou les structures existantes.

Type de sol :

- **Considérations** : Les propriétés du sol influencent la capacité d'infiltration et le ruissellement. Des sols bien drainants ou à faible capacité de rétention peuvent nécessiter des ajustements dans le design du prototype.

Usage spécifique :

- **Considérations** : L'adaptabilité du prototype dépendra aussi du type d'usage prévu. Pour un projet d'élevage de chevaux, la collecte d'eau peut servir à l'irrigation des pâturages ou à la fourniture d'eau potable, nécessitant des ajustements spécifiques pour répondre aux besoins de l'élevage.

Nous allons maintenant envisager le fait de l'implémenter dans un projet d'élevage de chevaux afin d'illustrer notre propos. L'implémentation du prototype sur un projet d'élevage de chevaux implique des considérations supplémentaires.

Dimensionnement du système :

- **Considérations** : La capacité de récupération et de stockage de l'eau doit être adaptée à la consommation d'eau des chevaux, qui peut être significative, en plus des besoins en irrigation des pâturages.

Gestion de l'eau :

- **Considérations** : Un système de gestion efficace doit être mis en place pour distribuer l'eau récupérée aux différents besoins, que ce soit pour l'abreuvement des animaux ou pour l'irrigation.

Infrastructure d'installation :

- **Considérations** : L'intégration du prototype doit respecter l'infrastructure existante (écuries, chemins d'accès) sans compromettre la fonctionnalité de l'élevage.

Afin d'optimiser et rectifier les constats précédents, nous proposons quelques pistes d'amélioration permettant l'adaptation du prototype.

Systèmes de filtration et de distribution :

- **Améliorations** : Intégrer des systèmes de filtration pour garantir que l'eau récupérée est propre et utilisable pour les chevaux. Des systèmes de distribution automatisés peuvent aider à gérer efficacement l'eau.

Réservoirs de stockage :

- **Améliorations** : Utiliser des réservoirs adaptés à la taille du projet pour stocker l'eau récupérée et assurer une distribution constante.

Intégration avec les pratiques agricoles :

- **Améliorations** : Adapter le système aux pratiques agricoles locales pour optimiser l'utilisation de l'eau dans les pâturages et autres zones de culture associées.

Ainsi, le prototype de récupération des eaux peut être efficacement intégré dans divers projets expérimentaux, à condition de bien évaluer les conditions locales et les besoins spécifiques du projet. L'adaptabilité du système à des contextes variés, tels que l'élevage de chevaux, démontre sa flexibilité et son potentiel pour contribuer à une gestion durable des ressources en eau. Pour chaque nouvelle application, une évaluation précise et des ajustements appropriés seront nécessaires pour maximiser les avantages du système tout en minimisant les impacts sur l'environnement et les infrastructures existantes.

CONCLUSION :

Le Larousse nous donne la définition suivante du mot « économie » : « Gestion où on réduit ses dépenses, où on évite des dépenses superflues » mais aussi celle-ci ; « Ce qu'on épargne, ce qu'on évite de dépenser. Car c'est bien de cela qu'il s'agit, épargner la planète passe par épargner les ressources de la planète. L'économie des ressources constitue probablement la démarche la plus simple, la plus logique.

Economiser les ressources nous contraint à revoir, à révolutionner nos modes de fonctionnement. C'est dans ce contexte qu'a été modélisé le prototype de récupération des eaux, réalisé au sein de centrales photovoltaïques.

Ces installations ont été réalisées mi-mai et continuent de récolter des données analysées en permanence, nous réservant déjà des résultats prometteurs.

Les prototypes de récupération d'eau, bien conçus et adaptés aux spécificités locales, peuvent optimiser les ressources tout en minimisant les effets environnementaux. Cependant, des ajustements techniques, ainsi que des outils de modélisation adaptés, sont nécessaires afin de garantir leur efficacité à long terme dans divers contextes.

Dans l'optique de déploiement de ce type d'installations sur de multiples sites, cela permettrait d'analyser si le système envisagé serait suffisant afin de subvenir aux besoins hydriques d'une culture quelle qu'elle soit et ainsi analyser les impacts à plus grande échelle sur un site hydrogéologique. Pour cela, il existe diverses études, un suivi des niveaux piézométriques et des relations entre système d'irrigation et les retours d'eau à la nappe.

LISTE DES FIGURES :

Figure 1 : Implémentation des centrales et tableau récapitulatif de leurs structures

Figure 2 : Modélisation du prototype sous différents angles

Figure 3 : Schéma conceptuel construit pour modéliser les différents cas d'études

Figure 4 : Schéma conceptuel construit avec le logiciel cropwat pour réaliser les modélisations

Figure 5,6,7 et 8 : Données nécessaire pour faire fonctionner le logiciel

Figure 9 : Modélisation de la zone d'étude de Clarensac via le logiciel Cropwat

Figure 10 : Modélisation de la zone d'étude de Calmont via le logiciel Cropwat

Figure 11 : Evolution du climat à l'horizon 2050

Figure 12 : Tableau montrant les volumes récupérés par le prototype au cours de son installation

Figure 13 : Indicateurs hydrogéologiques sur la commune de Clarensac obtenue via le logiciel Cropwat

Figure 14 : Indicateurs hydrogéologiques sur la commune de Calmont obtenue via le logiciel Cropwat

ANNEXES :

Annexe 1 : Tableau récapitulatif de l'utilisation de l'eau et de sa provenance pour l'élevage

| Ressources en eau | Avantages | Inconvénients | Contacts |
|--|--|---|---|
|  <p>Réseau d'eau potable</p> | <ul style="list-style-type: none"> - Qualité assurée jusqu'au compteur - Des dizaines de critères physico-chimiques de l'eau contrôlés | <ul style="list-style-type: none"> - Contaminations possibles après compteur - Sous-utilisation de parties des réseaux ruraux -> stagnation de l'eau - Manque d'entretien de certains réseaux - Manque de pression, débit parfois aléatoire | Syndicat des eaux |
|  <p>Forages et puits</p> | <ul style="list-style-type: none"> - Eau fraîche - Bonne qualité de l'eau - Nécessite peu d'entretien et peu d'emprise au sol - Investissement rapidement rentabilisé selon la ressource disponible | <ul style="list-style-type: none"> - Débit aléatoire selon les implantations - Projet soumis à déclaration ou autorisation selon son incidence sur le milieu - Pour le puits : possible risque de contamination bactériologique si source non protégée : infiltrations de boues, limons, matières organiques | DDT |
|  <p>Eaux de surface</p> | <p>Accès direct à la ressource :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Abreuvement autonome des animaux - Ne nécessite pas de source d'énergie <p>Eau prélevée et acheminée :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Demande peu d'entretien - Possibilité d'abreuver un nombre conséquent d'animaux si présence d'une réserve - Evite la dégradation des berges et la contamination du milieu - Nécessite moins de travaux pour la mise en place par rapport à un aménagement des berges | <ul style="list-style-type: none"> - Qualité et disponibilité de l'eau aléatoires, avec une vigilance sur la qualité aux périodes d'étiage - Dépendance vis-à-vis des pratiques en amont <p>Accès direct à la ressource :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Entretien à prévoir de la stabilisation de l'accès à la ressource <p>Eau prélevée et acheminée :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Contrôler régulièrement la crépine | Se rapprocher de la DDT et des Syndicats de Rivière |
|  <p>Récupération d'eau de pluie sur toiture</p> | <ul style="list-style-type: none"> - Ressource facilement disponible qui ne nécessite pas d'acheminement - Des subventions disponibles pour investir dans du matériel de récupération des eaux de pluie et de traitement - N'impacte pas le milieu par un prélèvement | <ul style="list-style-type: none"> - Ne couvre pas forcément l'intégralité des besoins du troupeau - Nécessité de procéder à un traitement pour s'assurer de la qualité de l'eau et nécessite un entretien régulier - Risques sanitaires (fentes, amiante, zinc, plomb) - Nécessité d'apport de minéraux supplémentaires aux animaux car l'eau de pluie est déminéralisée | DDT, Mairie |

| | |
|--|---|
|  <p>Ressource utilisable pour l'abreuvement des animaux</p> <p>Ressource utilisable pour le lavage des équipements en contact avec des produits destinés à la consommation humaine (tank, circuit de rinçage de la machine à traire)</p> <p>Ressource utilisable pour le nettoyage des quais de traite, tracteurs</p> | <p>Pour la qualité de l'eau :</p> <p>En vert : idéal</p> <p>En orange : utilisable sous réserves de surveillance de la qualité régulière</p> <p>En rouge : déconseillé</p> |
|--|---|

