

Évaluation économique du coût des sécheresses et de la mise en place de solutions de sécurisation de l'eau

Deux études de cas dans les Pyrénées-Orientales

Lucas Ralaivao

Encadrants : Katrin Erdlenbruch, Hichem Tachrift

Tuteur de stage : Thierry Rieu

Résumé

Ce travail propose une méthodologie pour chiffrer les coûts induits par la sécheresse sur le secteur agricole. Pour cela, nous avons créé un modèle dans lequel nous caractérisons une année de référence comprenant la localisation des parcelles dans l'espace, leur assolement, leur besoin en eau et leur rendement. Nous modélisons ensuite l'impact d'une sécheresse sur les rendements en appliquant un choc qui restreint l'eau disponible en nous basant sur l'année 2023, représentative de la sécheresse qui a frappé notre terrain d'étude entre 2022 et 2024. La comparaison entre l'année de référence et l'année sèche nous permet de quantifier les coûts économiques d'une sécheresse. Ceci étant, nous effectuons des Analyses Coûts-Bénéfices (ACB) sur deux projets en réflexion sur la vallée de l'Agly, un projet de Réutilisation des Eaux Usées Traitées (REUT) et un projet d'optimisation des réseaux d'irrigation (dit *Maillage*). La méthode des dommages évités est utilisée pour mesurer les bénéfices induits par ces projets. Nous montrons qu'une analyse spatiale des besoins en eau permet d'éviter de sous évaluer les coûts d'investissements. Dans le cas de Clairà, il semble qu'un projet de REUT ne soit économiquement pertinent que pour des scénarios où des sécheresses ont lieu au moins tous les deux ans. Dans le cas du projet *Maillage* et au vu des montants d'investissement disponibles quand ce travail est mené, il semble qu'une rentabilité économique peut être atteinte si une sécheresse advient tous les 5 ans ou moins. L'analyse d'incertitude que nous avons menée affine les résultats mais ne change pas les conclusions globales.

Remerciements

Je tiens à remercier Katrin Erdlenbruch, ma tutrice de stage, qui m'a aiguillé tout au long de ce travail et dont les conseils ont été cruciaux pour mener à bien une première expérience dans le monde de la recherche.

Je remercie Thierry Rieu pour avoir accepté de me guider dans ce travail. Son expérience et ses commentaires ont été importants pour la conception de ce mémoire.

Je remercie Hichem Tachrift et l'ensemble du Syndicat Mixte des Nappes du Roussillon pour m'avoir accueilli dans leurs bureaux et pour avoir été aussi présents pour répondre à mes questions.

Un grand merci à l'ensemble des acteur.ice.s qui ont bien voulu m'accorder leur temps pour partager leurs connaissances et sans lesquels ce travail n'aurait pu aboutir.

Enfin, un grand merci à Elise Bontemps dont le soutien a été nécessaire à la réalisation de ce travail. À Elise Bauer pour sa présence indéfectible. À Chloé Pedoni, à qui je dédie ce mémoire en l'honneur de notre amitié.

Table des matières

1	Introduction	6
1.1	Contexte et problématisation	6
1.2	Revue de littérature	10
2	Méthodologie	12
2.1	Caractérisation du secteur agricole : concepts et données	12
2.1.1	Caractérisation géographique	12
2.1.2	Besoins en eau d'irrigation	14
2.1.3	Rendements et valeur ajoutée	15
2.2	L'impact d'une sécheresse	15
2.2.1	Localisation des surfaces irriguées et besoin en eau d'irrigation	16
2.2.2	Lien entre sécheresse et disponibilité de la ressource en eau	18
2.2.3	Lien entre disponibilité de l'eau et rendement : les courbes de réponse à l'eau	19
2.2.4	Sur la différence entre parcelles irriguées et non irriguées	22
2.3	Analyse coûts bénéfices	23
2.3.1	La méthode des dommages évités	23
2.3.2	Méthode de calcul des bénéfices totaux : période de retour et actualisation	24
3	Application à nos terrains d'étude	26
3.1	Le projet de REUT à Clairia	26
3.2	Caractérisation du secteur agricole de la commune	26
3.2.1	Dommages induits, dommages évités et besoins en eau non-pourvus	29
3.2.2	Présentation de nos scénarios	30
3.2.3	Résultats	33
3.3	Le projet <i>Maillage</i> sur la vallée de l'Agly	34
3.3.1	Caractérisation du secteur agricole de la vallée	35
3.3.2	Les pertes de fonds sur la vallée de l'Agly	37
3.3.3	Financement du projet <i>Maillage</i> et Résultats	38
4	Analyse d'incertitude et de sensibilité	40
4.1	Analyse d'incertitude	40
4.1.1	Choix des bornes	40
4.1.2	Résultats sur Clairia	42
4.1.3	Résultats sur la Vallée de l'Agly	43
4.2	Analyse de sensibilité	44
4.2.1	Résultats sur Clairia	46
4.2.2	Résultats sur la vallée de l'Agly	46
5	Discussion	49
5.1	Extension possible : Changement d'assolement	49
5.2	Apports et limites	50

6 Conclusion	52
Références	56
A Annexes	57
A.1 Localisation de nos terrains d'étude	57
A.2 Calcul de l'EBE depuis le produit brut	58
A.3 Living Lab	59
A.4 Liste des acteur.rice.s de terrain rencontrés	60
A.5 Morceaux clés du modèle Python	61
A.5.1 Fonction de tirage aléatoire des inputs pour l'analyse d'incertitude	61
A.5.2 Calcul de la VAN pour Clairra pour différents scénarios d'investissement et plusieurs périodes de retour	61
A.5.3 Calcul des dommages évités pour la vallée de l'Agly	62
A.5.4 Calcul des indices de Sobol	63

Table des figures

1	Déficit Pluviométrique dans les Pyrénées Orientales (Janvier 2022 - Janvier 2024)	7
2	Déficit d'humidité des sols en France (Mai 2023 - Avril 2024)	7
3	Etat des nappes de la plaine de Roussillon par rapport à la normale	8
4	Parcelles irriguées : Vallée de l'Agly	16
5	Courbe de réponse à l'eau de l'olivier du Narbonnais	20
6	CRE pour la Vigne du Narbonnais : Années sèches et humides	21
7	CRE pour la Vigne du Narbonnais : Années sèches seulement	21
8	Illustration de la méthode des dommages évités	24
9	Assolement sur la commune de Clairà	27
10	Valeur ajoutée selon les parcelles	27
11	Besoins en eau d'irrigation selon les parcelles	28
12	Réduction des rendements suite à une sécheresse à Clairà	29
13	Impact sécheresse à Clairà et visualisation de la réinjection dans la nappe	32
14	Carte de l'assolement sur la vallée de l'Agly	35
15	BEEi selon les parcelles sur la vallée de l'Agly	36
16	Valeur ajoutée selon les parcelles sur la vallée de l'Agly	37
17	VAN du projet de REUT à Clairà en densité de probabilités, scénario 3	42
18	Dommages évités potentiels d'un projet sur la vallée de l'Agly	44
19	Méthodologie d'échantillonnage pour l'analyse de sensibilité	45
20	Indices de Sobol : Etude REUT sur Clairà	47
21	Indices de Sobol : Etude REUT sur Clairà (ratio B fixé)	47
22	Indice de Sobol sur les dommages évités potentiels de la vallée de l'Agly	48
23	Carte de la Plaine du Roussillon	57
24	Périmètres des projets étudiés	58
25	Schéma explicatif du calcul de la Valeur Ajoutée et de l'Excédent Brut d'Exploitation	58

Liste des tableaux

1	Surface agricole sur le périmètre de Clairà	13
2	Surface agricole sur le périmètre Agly Aval	13
3	BEEi moyen pour une saison	15
4	Comparaison BEEi calculés et Prélèvement observés (m3)	17
5	Restrictions sur les prélèvements en eau en période de crise	18
6	Impacts induits par la sécheresse sur les restrictions d'eau et les rendements	22
7	Comparaison des données hydriques et agricoles pour Clairà	28
8	Récapitulatif des VAN par scénario et par période de retour, en millions d'euros	33
9	Comparaison des données hydriques et agricoles sur la vallée de l'Agly	35
10	Dommages évités pour un projet de sécurisation de l'eau sur la vallée de l'Agly	39
11	Inputs probabilisés par cultures	41
12	Ecart entre la valeur ajoutée totale du scénario pistache et celle scénario initial, sur 30 ans, en millions d'euros	50

Liste des sigles

ACB	Analyse Coût-Bénéfice
ACB-DE	Analyse Coût-Bénéfice avec Dommages Évités
AEP	Alimentation en Eau Potable
ASA	Association Syndicale Autorisée
BNPE	Banque Nationale des Prélèvements quantitatifs en Eau
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
BRL	Bas Rhône Languedoc
CA66	Chambre d'Agriculture des Pyrénées-Orientales
CRE	Courbe de réponse à l'eau
DEA	Dommages Évités Annuels
DE	Dommages Évités
EBE	Excédent Brut d'Exploitation
EUT	Eaux Usées Traitées
IREEDD	Institut des Ressources Environnementales et du Développement Durable
OCDE	Organisation de Coopération et de Développement Économiques
PAC	Politique Agricole Commune
RA	Recensement Agricole
REUT	Réutilisation des Eaux Usées Traitées
RPG	Registre Parcellaire Graphique
SAU	Surface Agricole Utilisée
SAA	Statistique Agricole Annuelle
SIG	Système d'Information Géographique
STEP	Station d'Épuration
VA	Valeur Ajoutée

1 Introduction

1.1 Contexte et problématisation

Entre 2022 et 2024, le département français des Pyrénées-Orientales a connu une sécheresse inédite en intensité et en durée. Les nappes phréatiques ont atteint un niveau historiquement bas, certaines communes ont vu leurs réseaux d'eau potable coupés et des agriculteur.ices ont subi la perte d'une partie de leur récolte car les cultures n'ont pas résisté au stress hydrique. Cette catastrophe climatique, le 6ème rapport du GIEC affirme qu'elle est vouée à se reproduire et que sa probabilité d'occurrence va augmenter au cours des prochaines décennies IPCC [2023]. En effet, l'une des conséquences du changement climatique réside dans l'augmentation des occurrences des phénomènes extrêmes et des catastrophes naturelles. Sur le cas précis de la ressource en eau, cela signifie notamment des inondations plus fréquentes et plus intenses, mais aussi une augmentation des épisodes de sécheresses, plus intenses. En France, le projet Explore 70 a nationalisé les projections climatiques du GIEC, dans l'optique de fournir des ordres de grandeur sur l'impact du changement climatique dans notre pays. Les scénarios prospectifs montrent une diminution globale « de la piézométrie associée à une diminution de la recharge comprise entre 10 et 25% » à horizon 2070 [BRGM et al., 2024]. Concernant les eaux de surfaces, la même étude prévoit une baisse de la pluviométrie, « en moyenne de l'ordre de -16% à -23% », et « une diminution significative globale des débits moyens annuels à l'échelle du territoire, de l'ordre de 10% à 40% selon les simulations ». [BRGM et al., 2024]. Ces résultats sont d'autant plus alarmants pour la région Occitanie puisque la baisse de la recharge des eaux souterraines, par rapport aux niveaux présents, est supérieure à 50% pour une grande partie du territoire.

Il n'existe pas de définition unique et universelle pour qualifier la *Sécheresse*. En pratique, trois types de sécheresse peuvent être distingués : « les *sécheresses météorologiques*, qui désignent un déficit pluviométrique, les *sécheresses agricoles*, qui sont relatives au contenu en eau des sols, et les *sécheresses hydrologiques*, qui se manifestent par un faible débit des rivières. » [Erdlenbruch et al., 2013]. Fleming-Muñoz et al. [2023] choisi de considérer aussi ce qu'il appelle les *sécheresses socio-économiques*, qu'il définit comme la situation durant laquelle « une société subit des impacts induits par une sécheresse météorologique, agricole ou hydrologique ». Dans le cadre de ce travail la sécheresse fera référence à plusieurs de ces définitions. Nous le verrons dans la section 2.2.2, nous modélisons la sécheresse à partir de l'année 2023, qui est au cœur de l'épisode de sécheresse qui a frappé la plaine du Roussillon, le territoire abritant nos deux terrains d'études. Durant cette année les sols étaient globalement secs et le niveau des nappes plio-quaternaires¹ a chuté à des niveaux inédits. Ce sont ces deux indicateurs physiques qui définissent le mieux notre conception d'un phénomène *Sécheresse*, car ce sont eux qui vont impacter le plus le monde agricole, les sols secs n'alimentant plus les cultures et le niveau des nappes car les restrictions administratives d'irrigation sont calibrées à partir des niveaux piézométriques. Nous faisons l'hypothèse, largement adoptée par la littérature (Amigues et al. [2006], Fleming-Muñoz et al. [2023], Reynaud [2009], Debaeke and Bertrand [2008]), que la sécheresse implique des pertes de rendements et induit donc les dommages agricoles. Faisons toutefois la remarque que d'autres facteurs que le manque d'eau peuvent expliquer la diminution des rendements en

1. les nappes pliocène et quaternaire sont les deux nappes phréatiques présentes sur la plaine du Roussillon

période de sécheresse. En effet, une année sèche peut aussi être une année chaude (c'est souvent mais pas systématiquement le cas) pouvant diminuer les rendements du fait de processus agromonomiques (voir sur le même territoire Boillot et al. [2025]) ou de perte de productivité du travail (Zhang and Shindell [2021]). Cependant nous attribuerons sur nos terrains d'étude l'intégralité de la perte de rendement calculé à la diminution de la disponibilité en eau.

Dans les Pyrénées Orientales, la sécheresse a donné lieu à une situation hydrique se caractérisant par des sols secs, des niveaux des nappes phréatiques bas et une pluviométrie déficitaire, comme nous pouvons le voir dans les graphes suivants :

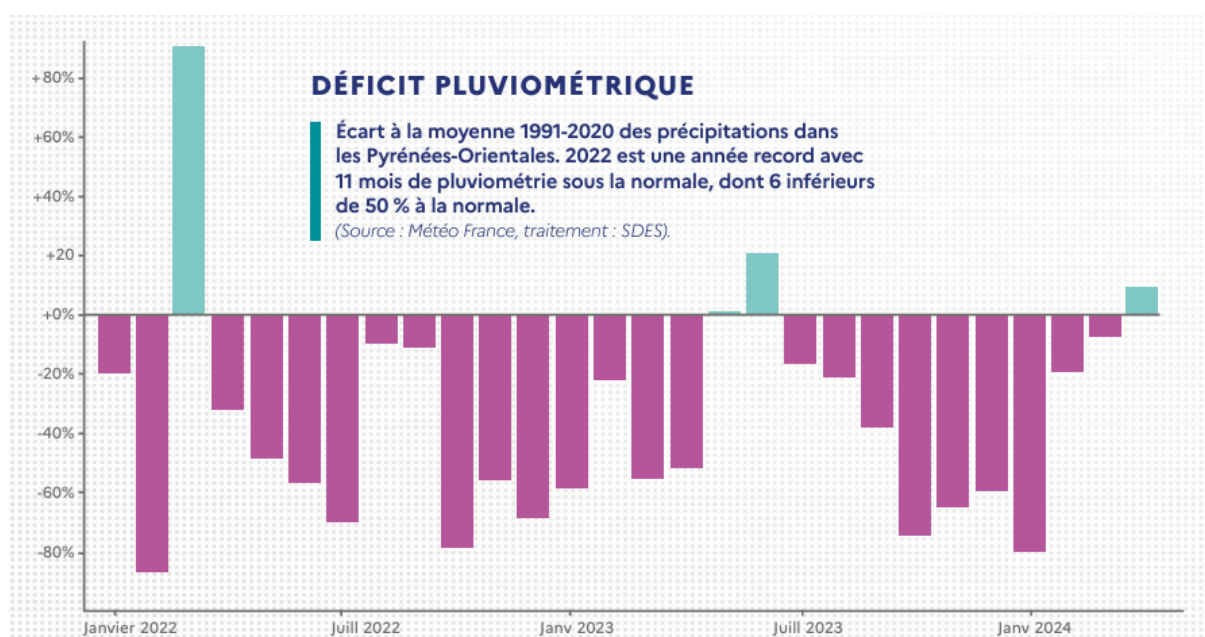


FIGURE 1 – Déficit Pluviométrique dans les Pyrénées Orientales (Janvier 2022 - Janvier 2024)

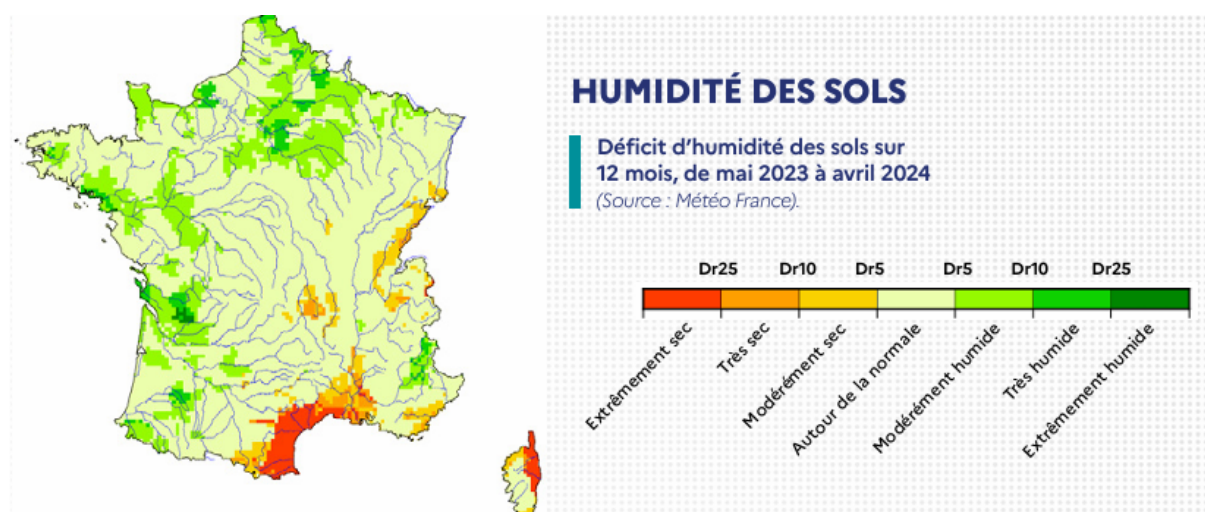


FIGURE 2 – Déficit d'humidité des sols en France (Mai 2023 - Avril 2024)

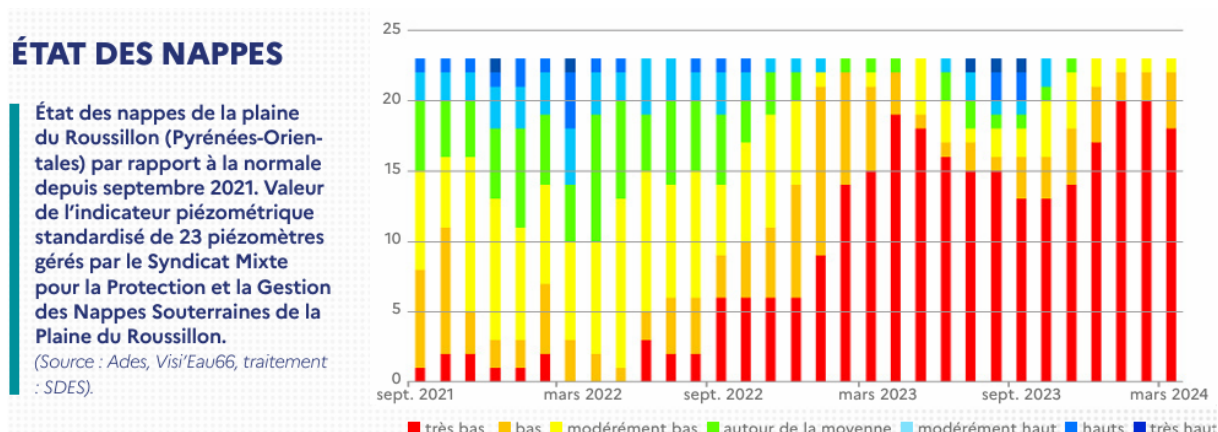


FIGURE 3 – Etat des nappes de la plaine de Roussillon par rapport à la normale (depuis Septembre 2021)

Les récents épisodes de sécheresses observés sur le territoire français donnent un aperçu des conditions climatiques avec lesquelles l'agriculture française va devoir davantage travailler dans les décennies futures. Ces nouvelles conditions poussent les acteurs privés et l'Etat à investir dans des solutions d'adaptation augmentant l'offre en eau ou réduisant la demande en période de sécheresse. Pour cela, des investissements massifs sont nécessaires et la collectivité contribue en grande partie aux financements de ces projets puisque des subventions publiques à hauteur de 80% des coûts d'investissements totaux existent pour les infrastructures qui relèvent du domaine de l'eau. La question de la pertinence économique de ces projets se pose alors et des analyses doivent être menées pour que les investissements soient fléchés du mieux possibles vers des projets maximisant le bien commun.

Nous travaillons plus particulièrement sur le bassin versant de l'Agly, un des territoires les plus durement touchés et sur lequel plusieurs projets d'adaptation au stress hydrique sont étudiés pour pallier les risques supportés par l'agriculture. Notre approche est sectorielle, nous n'incluons pas d'autre secteur que l'agriculture.

Notre premier terrain d'étude se trouve à Clairà², une commune très active dans la recherche de solutions d'adaptation à ces nouvelles conditions climatiques. La commune accueille un Living Lab (A.3) étudiant les solutions de Réutilisation des Eaux Usées Traitées (REUT) dans le cadre du *Défi Clé Water Occitanie*, une initiative de la région pour améliorer la connaissance sur les réusages de l'eau, structurer la recherche sur le territoire et construire des projets de recherche en coopération avec les acteurs de terrains pour qu'ils trouvent une réalité opérationnelle. Plus concrètement, la commune a lancé des études de faisabilité hydrologique et économique pour évaluer la pertinence d'un projet visant à réutiliser les eaux traitées par la station d'épuration de la ville dans une logique d'économiser de l'eau et de sécurisation de l'approvisionnement d'une partie des exploitations agricoles avoisinantes. Notre travail alimente cette réflexion en apportant un point de vue économique sur l'utilisation d'EUT pour des usages agricoles sur la commune.

Notre second terrain d'étude est plus vaste. Nous considérons en effet plusieurs communes en aval du barrage de Caramany dans le bassin versant de l'Agly, celles-ci correspondent aux terri-

2. la localisation des deux terrain d'étude est disponible sur les figures 23 et 24 dans l'annexe A.1

toires pouvant bénéficier d'un projet de sécurisation de l'eau porté par la Chambre d'Agriculture et par le Conseil Départemental et que nous appellerons dans ce travail le *Projet Maillage*. En réaction à l'épisode de sécheresse, un « Plan de résilience pour l'eau dans les Pyrénées Orientales » a été adopté en 2024 dans le but d'apporter des solutions rapides et concrètes pouvant améliorer la situation à court terme. Le projet *Maillage* fait partie de sept projets dits « sans regrets » adoptés dans le cadre de ce plan, l'objectif étant d'optimiser les réseaux d'irrigation déjà existants entre le barrage et le littoral.

Ces deux projet constituent une adaptation du secteur agricole via des infrastructures visant à augmenter l'offre en eau. Historiquement, il existe dans le département un manque d'information vis-à-vis de la pertinence économique de projets similaires. En effet, les études de faisabilité survolent généralement ce volet et rares sont les quantifications objectives des gains induits par leur mise en place. Comme l'écrivent Erdlenbruch et al. [2008], l'analyse coûts-bénéfices (ACB) permet de générer ce type d'informations, utiles pour la prise de décision. Elle repose sur la monétarisation de tous les facteurs qui pourraient rentrer dans le paradigme de la rentabilité économique. Si des critiques existent sur la monétarisation et notamment sur les difficultés rencontrées lors de la prise en compte des valeurs non marchandes (l'exemple paradigmatique étant l'environnement), avoir un indicateur synthétique unique reste un atout majeur pour juger de la pertinence d'un projet [Henry, 1984]. La valeur actualisée nette (VAN) est cet indicateur. Elle permet de synthétiser tous les coûts et bénéfices qui sont attachés à un projet d'investissement en une seule unité et en un seul point temporel. En effet, l'ACB ne se contente pas de comparer des éléments de nature différente - par exemple un gain financier et un coût sur la biodiversité - elle permet aussi de comparer deux coûts à des temporalités différentes.

Les enjeux soulevés par l'augmentation des occurrences de sécheresse sur le secteur agricole sont importants. Du fait de l'ampleur des dégâts qu'elle cause mais aussi de l'intrication du secteur agricole dans le système de gestion de l'eau, la problématique *Sécheresse* ne peut pas être gérée par le seul secteur agricole et doit être traitée par la collectivité. Celle-ci finance la majeure partie du coût d'investissement des solutions d'adaptation choisies par les acteurs de terrain, dans notre cas une augmentation de l'offre en eau, via les Agences de l'eau et les collectivités territoriales. Cependant, le risque de mésadaptation existe et le budget consacré à l'adaptation au changement climatique et, *a fortiori*, à l'adaptation aux sécheresses est restreint. Chaque euro investi doit donc l'être dans le cadre informationnel le plus complet possible permettant aux décideurs de choisir dans le sens de la maximisation du bien-être commun. La question de la pertinence économique de tels projets d'adaptation se pose alors et ce travail propose de répondre à la problématique suivante :

Comment évaluer économiquement la pertinence d'un projet structurel visant à adapter le secteur agricole aux phénomènes conjoncturels et incertains que sont les sécheresses ?

Notre travail sera structuré en trois parties. Nous expliquerons premièrement notre méthodologie pour comptabiliser les coûts induits par la sécheresse et pour évaluer les solutions de sécurisation prises en compte. La deuxième partie exposera les résultats que nous obtenons sur

nos deux terrains d'études. Dans la troisième partie nous proposons une analyse de sensibilité et d'incertitude pour améliorer l'information et la robustesse de nos résultats. Enfin, nous proposons dans une dernière partie de discuter de potentielles extensions et de ce qu'apporte notre travail.

1.2 Revue de littérature

Avant de procéder à l'étude proprement dite, nous allons situer notre travail dans des champs de recherche afférents pour montrer à quoi il fait référence et comment il peut différer d'autres méthodologies observées dans la littérature. Cette revue de la littérature est nécessairement succincte, par manque de place, et pour permettre une description plus détaillée de notre étude proprement dite

La question des impacts de la sécheresse s'est posée dans plusieurs champs scientifiques. À l'international, la commission européenne a conclu à un manque d'information sur les coûts induits par les sécheresses et a pointé la nécessité d'avoir davantage d'analyses de coûts [European Commission, 2007]. En France, une vaste étude menée par Amigues et al. [2006] a étudié les interactions entre l'agriculture et la ressource en eau. L'étude a montré que le secteur de l'agriculture est à la fois consommateur (évapotranspiration d'une partie des pluies et de l'eau d'irrigation) et contributeur (les sols occupés par des cultures agricoles restituent plus d'eau en drainage et en ruissèlement que des sols « naturels » comme les forêts et les prairies). Ils concluent aussi à la nécessité d'adapter l'agriculture française de manière structurelle aux phénomènes « conjoncturels mais récurrents » que sont les sécheresses. Ils identifient deux voies allant dans ce sens : l'augmentation de la ressource et les économies d'eau. Ils soulignent le fait qu'aucune de ces deux solutions n'apparaît plus souhaitable que l'autre, qu'elles peuvent être complémentaires et que le choix d'adaptation doit s'envisager « à l'échelle territoriale par un croisement des caractéristiques du milieu et des spécificités territoriales et économiques de l'activité agricole » [Amigues et al., 2006]. Les auteurs soulignent enfin l'importance de s'appuyer sur des bases de données spatialisées.

La quantification des impacts de la sécheresse sur le secteur agricole a fait l'objet de plusieurs publications. Debaeke and Bertrand [2008] proposent une évaluation de la sécheresse sur le rendement de plusieurs grandes cultures dans quatre régions de France. Les auteurs s'appuient sur une analyse des séries chronologiques des rendements et font une analyse contrefactuelle pour calculer les pertes de rendements en année sèche. Cette analyse a permis de confirmer l'importance des sécheresses passées (1976, 2003, 2005 et 2006) et d'identifier des disparités entre régions sur les pertes de rendement. Ainsi, la sécheresse de 1976 a davantage diminué les rendements des grandes cultures du Nord de la France quand celle de 2003 a plus touché le Sud.

Reynaud [2009] étudie l'impact économique des sécheresses sur le secteur agricole via le couplage d'un modèle agronomique (STICS) et d'un modèle d'optimisation du calcul économique (fonction objectif basée sur l'espérance d'utilité). L'auteur distingue les capacités d'adaptation de court terme (pilotage des quantités d'eau, d'engrais et de pesticides utilisés) et de long terme (choix de l'assolement et des technologies d'irrigation) et montre que l'adaptation des cultures permet de limiter significativement le coût privé induit par les sécheresses.

L'échelle relativement restreinte de notre terrain d'étude permet d'avoir accès à des données précises sur la localisation des parcelles et sur leurs assolements. Nous disposons aussi de données

régionalisées sur les besoins en eau et les rendements. Compte tenu des informations disponibles, nous avons choisi de quantifier l’impact de la sécheresse sur une année par analyse contrefactuelle en comparant des données hydrologiques, agronomiques et économiques pour une année de référence et les mêmes données pour une année sèche. La construction des données pour une année sèche étant obtenu par l’utilisation de courbes de réponse à l’eau issues du modèle agro-nomique SIMETAW [Mancosu et al., 2016], ces courbes nous permettant de calculer les pertes de rendements.

Les précédentes études sont importantes pour prendre la mesure des dégâts que peut engendrer une sécheresse sur le secteur agricole. Ce constat étant fait, les solutions d’adaptation doivent y être confrontées pour évaluer leur pertinence d’un point de vue économique. Pour cela, nous utilisons la méthode de l’analyse coûts-bénéfices (ACB) qui est très utilisée comme outil d’évaluation dans le cadre de grands projets d’infrastructure. Ainsi, l’OCDE a rédigé deux rapports (OCDE [2007] ; OCDE [2019]) qui recensent la théorie et les applications de l’ACB dans le cadre de projets en lien avec l’environnement. Plusieurs méthodes d’évaluation des coûts et des bénéfices sont compatibles avec une ACB, les articles suivants sont des exemples de méthodes qui ont été adoptées dans le cadre de recherches similaires aux nôtres.

Loubier and Declercq [2014] mesurent les coûts et bénéfices directs de la mise en place de trois projets de REUT. Ils ont mis en évidence des points communs qui facilitent la cohérence et la mise en place de tels projets : la proximité géographique entre la STEP et les principaux utilisateurs ; l’existence de liens entre les fournisseurs des services de REUT et les usagers ; un contexte local propice menant à la réflexion sur des projets de REUT.

Molinos-Senante et al. [2010] proposent une ACB sur des projets de REUT basée sur un calcul des bénéfices par shadow-price. Les auteurs proposent d’internaliser les externalités négatives du traitements des eaux en estimant le coûts des “productions négatives”, comme les boues résiduelles supplémentaires après traitement, qui ont un effet néfaste sur l’environnement.

Toujours dans le domaine de la REUT, Arborea et al. [2017] conduisent une ACB en comparant deux scénarios : dans le premier l’eau des nappes souterraines est remplacée par l’EUT pour alimenter l’agriculture existante ; dans le second cette eau sert à irriguer de nouvelles parcelles. Ils utilisent la méthode des prix hédoniques pour donner une valeur à l’eau d’irrigation.

Erdlenbruch et al. [2008] mènent une ACB pour étudier les mesures de protection des inondations en utilisant la méthode des dommages évités pour construire les bénéfices d’une politique de prévention. Les inondations sont caractérisées par leur intensité et par leur période de retour, c’est-à-dire la fréquence à laquelle elles surviennent dans le temps.

Notre travail s’inspire directement de ce dernier article puisque nous reprenons la méthode des coûts évités. Cela nous permet d’utiliser une seule méthode pour calculer des coûts induits par la sécheresse sur l’agriculture et de chiffrer des bénéfices potentiels pour des solutions d’adaptation. Nous utilisons aussi le concept de période de retour permettant de caractériser la probabilité d’occurrence d’une année sèche sur la durée de vie d’un projet. En somme, l’ACB présente dans notre cas plusieurs avantages : 1. Produire une information qui n’existait pas auparavant sur le territoire, à savoir un chiffrage des coûts induits par la sécheresse sur la région 2. Proposer une méthodologie reproductible pour calculer des gains qui puissent être associés à des projets qui ont pour objectif d’éviter des pertes de rendements (on peut imaginer comparer deux projets de

nature différente comme une optimisation des réseaux d'irrigation et un changement structurel de l'assolement dans la région) 3. Fournir un outil d'aide à la décision aux acteurs locaux sur le plan économique, un critère important pour juger de la pertinence d'un projet.

Grelot et al. [2013] proposent un guide méthodologique permettant de faire une analyse d'incertitude et de sensibilité sur des ACB utilisant la méthode des dommages évités. Nous suivons cette méthodologie dans notre quatrième partie.

2 Méthodologie

Notre travail consiste à monétiser l'impact de la sécheresse sur le secteur agricole et d'évaluer la cohérence économique de la mise en place de projet de sécurisation de l'eau. Pour ce faire, il est d'abord nécessaire de caractériser ce secteur, c'est-à-dire d'identifier des éléments les plus objectifs possibles qui serviront de données d'entrées à notre modèle (2.1). Cette caractérisation se fera sur le plan géographique, économique et partiellement hydrologique. Cela étant, il faudra qualifier le phénomène *Sécheresse*. Nous expliquerons donc comment nous représentons cet événement climatique dans notre modèle et comment il impacte le secteur agricole. Enfin, nous rappellerons comment la méthode de l'Analyse Coûts-Bénéfices (ACB) peut évaluer la pertinence économique d'un projet d'adaptation à la sécheresse.

2.1 Caractérisation du secteur agricole : concepts et données

2.1.1 Caractérisation géographique

L'adoption de données localisées permet à notre analyse économique de garder une assise concrète puisque tous nos résultats seront basés sur des surfaces agricoles. En effet, les rendements d'un territoire, mais aussi les besoins en eau d'irrigation agricole, seront fonction des surfaces, ce qui permet d'avoir de la flexibilité si on veut changer l'assolement du territoire que l'on étudie. Il sera donc peu coûteux de reproduire notre analyse pour un territoire de taille différente ou avec un assolement différent, ce qui peut être utile dans une démarche prospective où différents scénarios peuvent être envisagés.

D'un point de vue pratique, plusieurs bases de données peuvent être utilisées. Le Recensement Agricole (RA), produit tous les dix ans des informations sur les surfaces et les rendements des exploitations agricoles françaises. Il s'appuie sur des données déclaratives provenant directement des exploitations agricoles. Le Registre Parcellaire Graphique (RPG) est une base de données qui s'appuie sur les déclarations d'éligibilité aux aides PAC. Son champ d'action est moindre que celui du RA mais ses données sont plus précises puisqu'il fournit un *Maillage* à la parcelle tandis que les données RA sont communales. Ces deux bases de données présentent leurs avantages et inconvénients respectifs. Le RA couvre une plus grande partie des exploitations agricoles et fournit des données économiques qui seraient intéressantes pour notre étude. Néanmoins, avoir l'exploitation comme objet et non les parcelles implique que la localisation des surfaces n'est pas complètement fiable. Ceci justifie en grande partie la différence entre les données du RA et du RPG que l'on constate dans les tableaux 1 et 2 . Le RPG présente quant à lui le défaut d'être représentatif des seules parcelles appartenant à des exploitant.e.s éligibles aux

aides PAC, il y a donc le risque qu'une partie de la SAU ne soient pas comptée dans notre étude. Par ailleurs, il existe une troisième source de données dans les Pyrénées-Orientales puisque la Chambre d'Agriculture (CA66) a effectué un recensement exhaustif des parcelles par photo-interprétation ou par relevé de terrain. Nous avons choisi de travailler avec cette dernière base de données, considérant que cette source, datant de 2024, est la plus fiable.

Ainsi toutes les données que nous allons produire, qu'elles sont économiques ou hydrologiques, s'appuieront sur les surfaces agricoles fournies par le service SIG de chambre d'agriculture des Pyrénées-Orientales. Nous avons sélectionné dans cette base les surfaces que nous considérons comme utiles dans notre analyse, c'est-à-dire les surfaces productives et potentiellement bénéficiaires de l'irrigation (on exclue les parcelles en jachère et les prairies). Ces surfaces sont constituées des quatre principales cultures du département : Vignes, Vergers, Céréales, Maraîchage.

Surface Clairia (ha)	RA (2020)	RPG (2020)	Recensement CA66 (2024)
Vergers	/	101	204
Vignes	/	251	292
Maraîchage	/	32	141
Céréales et autres	/	56	104
TOTAL	379	440	742

TABLE 1 – Surface agricole sur le périmètre de Clairia

Surface Agly Aval (ha)	RA (2020)	RPG (2020)	Recensement CA66 (2024)
Vergers	/	502	624
Vignes	/	3435	4464
Maraîchage	/	67	203
Céréales et autres	/	281	161
TOTAL	6691	4285	5451

TABLE 2 – Surface agricole sur le périmètre Agly Aval

Comme expliqué précédemment, les différences constatées entre les bases de données peuvent être expliquées par les méthodologies adoptées. Dans le cas de la vallée de l'Agly, il existe une différence entre les surfaces recensées par le RA et celles recensées par la chambre d'agriculture alors même que ces deux bases de données sont censées être exhaustives, contrairement à celle du RPG qui se fonde sur les déclarations PAC. L'écart s'explique par le fait que, dans le RA, les parcelles sont associées à la commune du siège de l'exploitation agricole, alors que la Chambre d'agriculture localise les parcelles dans la commune de la parcelle elle-même. Nous concluons donc qu'il existe un grand nombre d'hectares agricoles détenus par des exploitations de la vallée de l'Agly qui ne sont pas localisées dans la vallée, puisque le recensement agricole déclare 1140 hectares de plus que la chambre d'agriculture. Notons aussi que les chiffres que nous comparons sont issus d'années différentes et qu'une part de l'écart peut aussi s'expliquer par une diminution de la SAU cultivée.

2.1.2 Besoins en eau d'irrigation

Il est utile d'expliciter les termes que l'on utilise ici pour éviter les doutes sur la nature des besoins en eau. Dans l'entièreté de ce travail, le terme de « besoin en eau d'irrigation » (BEEi) désignera la consommation de la plante en eau d'irrigation. Ce chiffre se distingue du prélèvement en eau des agriculteurs et de la consommation totale de la plante. En pratique, le prélèvement en eau sera plus élevé que les BEEi, la relation entre les deux dépend de l'efficacité du réseau d'eau local qui peut être plus ou moins efficace selon la vétusté des canaux, des fuites sur les tuyaux, des pratiques et matériels d'irrigation, etc.

Il existe sur notre territoire une problématique sur le chiffrage des prélèvements en eau agricole. En effet, il existe deux principaux moyens de s'approvisionner en eau dans la plaine du Roussillon : l'adhésion à une Association Syndicale Autorisée³ (ASA), qui connaît relativement bien les besoins de ses adhérents et ses prélèvements en eau dans le milieu ; et les prélèvements dans la nappe plio-quaternaire (principalement quaternaire) via des forages individuels, très répandus et faciles à obtenir, et dont la connaissance des volumes prélevés associés s'améliore mais reste partielle du fait de l'absence de compteur et de l'imcomplétude du recensement de ces ouvrages sur la plaine du Roussillon. Ces deux manières d'obtenir de l'eau sont comptabilisées dans la base de données BNPE (Banque Nationale de Prélèvement en Eau)⁴ mais, en raison de la non-exhaustivité de ces données, et sur les conseils de différents acteurs de terrains, nous avons décidé de ne pas utiliser directement cette source statistique et de reconstruire les BEEi totaux du secteur agricole à partir des données de l'entreprise BRL (Bas Rhône Languedoc) qui fournit des BEEi par culture et par hectare représentatifs pour le département. Les données de la BNPE nous servent de données de contrôle.

Pour construire les BEEi de notre territoire, nous croisons les surfaces parcellaires fournies par la Chambre d'Agriculture au modèle hydrologique de l'entreprise BRL (Bas Rhône Languedoc) qui fait référence sur notre terrain d'étude⁵. Ainsi les besoins en eau d'irrigation sont calculés en prenant par la formule suivante :

$$BU_{k;n} = KC_{i;n} \times ETP_{k;n} - P_{k;n} - RU_{n-1} \quad (1)$$

avec $ETP_{k;n}$ l'évapotranspiration potentielle de la décade n , sur la zone climatique k ; $P_{k;n}$ la précipitation efficace de la décade n sur la zone climatique k ; $KC_{i;n}$ le coefficient cultural de la culture i sur la décade n et RU_{n-1} la réserve utile du sol à la fin de la décade précédente $n - 1$.

Ces données font foi à l'échelle du département des Pyrénées-Orientales et nous ne disposons pas de modèle plus précis. À chaque culture de notre analyse nous attribuons un BEEi moyen par année correspondant aux cultures les plus représentatives du territoire de la base de données BRL. Ainsi, les BEEi des vergers de notre analyse correspondent à la culture de l'abricot dans la base BRL, seule représentante de l'arboriculture dans la vallée. Les BEEi des céréales sont

3. Groupement de propriétaires permettant de réaliser des travaux collectifs allant dans le sens de l'intérêt général ou de gérer des ouvrages

4. <https://bnpe.eaufrance.fr/acces-donnees/codeCommune/66071/annee/2022>

5. https://www.brl.fr/phototheque/photos/memento/memento_2019_web.pdf

approchés par une moyenne des besoin du blé et du maïs, deux cultures présentes dans la vallée en 2020 d'après la base de données RPG. Le reste des données est consultable dans le tableau 3.

Cultures	BEEi	Source
Vergers	3520	Abricot (BRL)
Vignes	800	Vigne (BRL)
Maraîchage	5700	Artichaut/Chou/Epinaud (Acteurs de terrain)
Céréales	4195	Blé/Maïs (BRL)

TABLE 3 – BEEi moyen pour une saison

2.1.3 Rendements et valeur ajoutée

L'ACB nécessite de monétariser tous les éléments qu'elle étudie pour pouvoir réduire à un même indicateur synthétique les coûts et bénéfices de différentes natures advenant à différentes dates. Il existe deux indicateurs intéressants pour évaluer la valeur créée par une exploitation : la Valeur Ajoutée (VA) et l'Excédent Brut d'Exploitation (EBE). La figure 25 en annexe explique comment ils sont calculés. La valeur ajoutée prend en compte toute la valeur créée par l'activité agricole. C'est un avantage pour une ACB qui se veut globale dans la comptabilisation des dommages et donc mesurer toute les pertes que pourrait engendrer une sécheresse, que ce soit sur le revenu de l'agriculteur mais aussi sur le revenu des salariés ou même sur le montant des impôts reversés à la collectivité. L'EBE s'apparente davantage au revenu de la seule exploitation agricole, subventions comprises. Dans la mesure où nous n'avons pas de données pouvant nous fournir une information à l'échelle départementale, nous choisissons la donnée qui nous paraît la plus pertinente, à savoir la valeur ajoutée. Nous la calculons grâce à des ratios $\frac{ValeurAjoutée_i}{ProduitBrut_i}$ calculés via la base de données RICA (Réseaux d'Information Comptable Agricole) qui fournit des données comptable d'un échantillon représentatif des exploitations agricoles française. Nous l'obtenons via le calcul suivant :

$$VA(i) = Rendement(i) \times Px(i) \times RatioVA(i) = Rendement(i) \times Px(i) \times \frac{VA(i)_{RICA}}{PB(i)_{RICA}}$$

L'indice i représente une des quatre cultures étudiées. Toutes les variables sont différenciées par cultures. Le rendement par hectare, en quintaux, est obtenu via la base de données SAA (Statistique Agricole Utile). Cette statistique a un *Maillage* départemental, n'ayant pas pu obtenir des chiffres plus précis pour notre territoire nous considérons qu'ils font foi sur celui-ci. Les prix (base 2020 en suivant le Recensement Agricole) sont issus de France Agrimer⁶.

2.2 L'impact d'une sécheresse

L'essence de notre modèle réside dans le lien entre production agricole et disponibilité en eau. Notre analyse repose sur l'idée qu'un épisode de sécheresse, en faisant diminuer la disponibilité en eau, réduit la production agricole. La section suivante explique comment une sécheresse est modélisée et en quoi elle altère les rendements agricoles de nos terrains d'étude.

6. <https://nm.franceagrimer.fr/prix?FRUITS-ET-LEGUMES>

2.2.1 Localisation des surfaces irriguées et besoin en eau d'irrigation

Pour répondre à la question sur les pertes de rendement induits par la baisse des quantités d'eau disponible, il faut d'abord savoir de quelle quantité d'eau le secteur agricole a besoin. Or il n'existe pas de chiffres objectifs, ou même consensuels, qui répondent à cette question dans la plaine du Roussillon et, a fortiori, sur la vallée de l'Agly. Il faut alors créer ces données. Nous avons vu précédemment que nous utilisons le modèle hydrologique de BRL pour obtenir des besoins en eau par culture. Ces besoins sont normalisés à l'hectare, le croisement de ces données et du nombre d'hectares irrigués par culture fournit un besoin en eau d'irrigation global du terrain d'étude choisi. Nous construisons grâce à un logiciel SIG des zones d'irrigation à partir de trois sources :

- L'étude DEM'EAUX, menée par le BRGM, qui a recensé en 2018 par images satellitaires des parcelles irriguées et les cultures produites sur celles-ci.
- La base de données des forages agricoles, fournie par le Syndicat des Nappes du Roussillon, qui recense les ouvrages, la nature des usages (AEP, irrigation, etc) et les besoins déclarés par les usagers. Nous considérons qu'une parcelle sur laquelle se trouve un forage agricole est irriguée.
- Des cartes délimitant approximativement le périmètre des ASA, tirées de différentes présentations et rapports de la chambre d'agriculture.

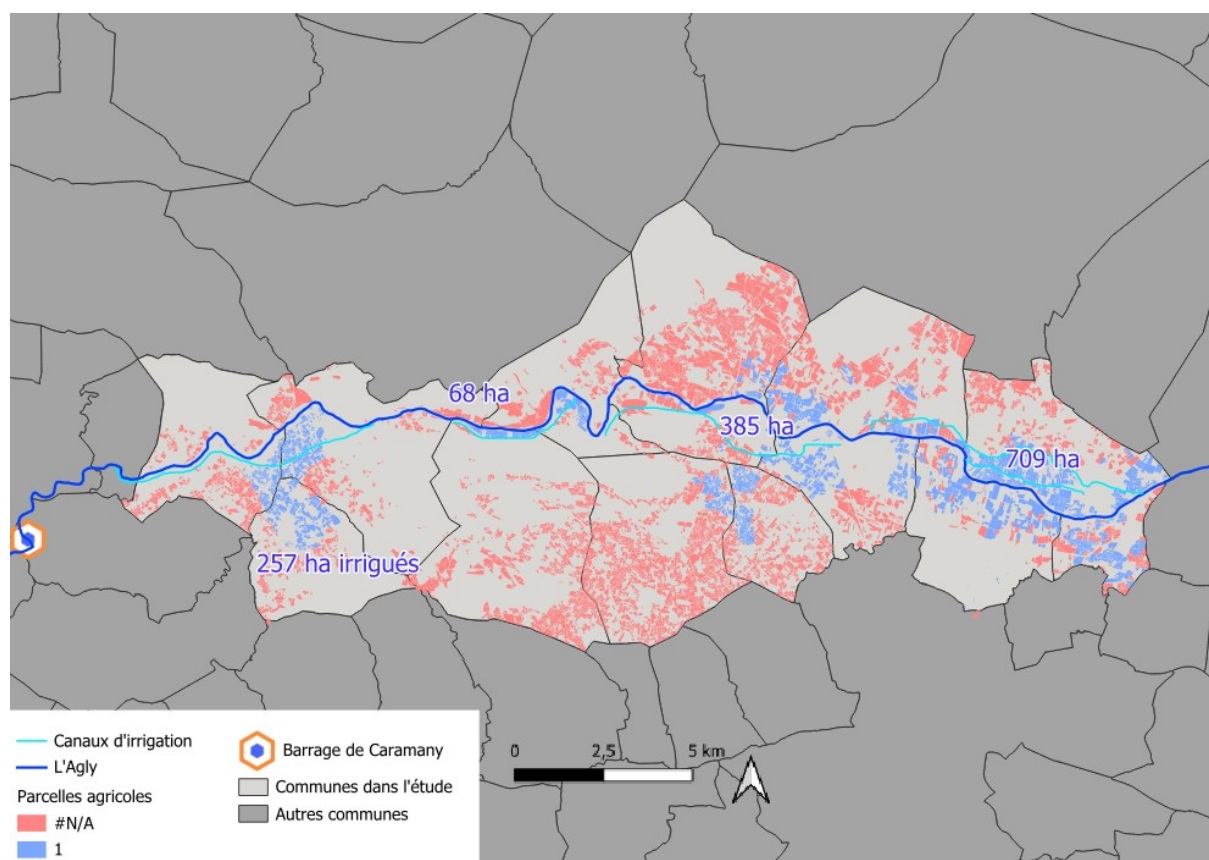


FIGURE 4 – Parcelles irriguées : Vallée de l'Agly

Ce travail aboutit à la figure 4. La somme des surfaces irriguées est de 1419 hectares, ce qui correspond aux dires de différents acteurs de terrains que nous avons pu rencontrer, nous avons donc décidé de valider cette méthode et ces chiffres. L’outil SIG permet de croiser différentes couches de données géographiques, ainsi nous pouvons associer à chaque parcelle la culture produite et dire si elle est irriguée ou non. Toutes les informations nécessaires sont désormais réunies pour construire nos données sur les besoins en eau d’irrigation de nos deux terrains d’étude, ceux-ci sont comparés aux données de la BNPE dans le tableau 4

Communes	BEEi calculés	Prélèvements Agricoles BNPE 2022
Claira	1 442 460	1 132 196
Rivesaltes	885 673	343 832
Espira de l’Agly	124 722	286 924
Cases-de-Pène	32 215	3 659 513
Estagel	135 499	/
Latour de France	63 374	1 393 517
Montner	93 988	/
Pia	639 947	496 196
Baixas	42 008	/
Calce	22 710	/
Pereystortes	61 974	/
<i>Planèzes</i>	/	<i>1 315 015</i>
TOTAL	3 544 575	8 647 193

TABLE 4 – Comparaison BEEi calculés et Prélèvement observés (m3)

Plusieurs remarques peuvent être faites sur les différences entre les prélèvements observés et les besoins calculés :

- Les totaux sont cohérents car on s’attend effectivement à des prélèvements plus élevés que les besoins. Cela peut être dû à l’efficacité partielle des réseaux qui engendre des pertes lors du chemin que parcourt l’eau de la prise d’eau à la plante. Cela peut aussi être dû aux pratiques d’irrigation des agriculteurs pouvant parfois mener à des prélèvements trop importants par rapport aux besoins réels de la plante. Rappelons que nous savons qu’il existe des forages individuels sur la plaine dont les prélèvements ne sont pas connus, les prélèvements réels sont donc probablement supérieurs aux chiffres BNPE présentés ici.
- La différence drastique entre besoins et prélèvements pour les communes comme Latour-de-France ou Cases-de-Pènes s’explique par la méthodologie de comptabilisation de la BNPE. En effet, celle-ci associe les prélèvements à la commune où se trouve la prise d’eau et non aux communes pour lesquelles cette eau est prélevée *in fine*. Par exemple nous savons que l’ASA de la Plaine, qui alimente Latour-de-France, Montner et une partie d’Estagel prélève son eau à Planèzes (qui n’est pas dans notre terrain d’étude), d’où la différence entre les besoins et les prélèvements intra-communes.

En ce qui concerne la commune de Clairà, les besoins en eau sont supérieurs aux prélèvements sur la commune, mais ces prélèvements ne prennent en compte que les prélèvements individuels déclarés. Les agriculteurs bénéficient aussi de l’eau mise à disposition par l’ASA de Saint-Pierre dont les canaux font circuler une eau prélevée à la prise d’eau de Cases-de-Pène, donc non comptabilisée à Clairà par la BNPE.

2.2.2 Lien entre sécheresse et disponibilité de la ressource en eau

Les besoins en eau totaux étant connus, il faut établir une méthodologie permettant de caractériser une sécheresse et son impact sur les rendements agricoles. Une étude a été précédemment menée pour évaluer la pertinence hydrologique et économique d'un projet de REUT sur la commune de Clairac [IREEDD, 2023]. Les deux bureaux d'étude avaient alors opté pour la méthodologie suivante : les restrictions administratives sur l'utilisation de l'eau pour l'agriculture étant directement fonction des niveaux piézométriques (ce qui est cohérent avec l'arrêté cadre sécheresse), une première relation linéaire est établie entre le niveau des nappes phréatiques et le nombre de jours de restriction dans l'année, puis une seconde relation linéaire lie ce nombre de jours aux quantités d'eaux prélevables pour l'irrigation. Par transitivité le niveau des nappes détermine linéairement les quantités d'eau d'irrigation que les agriculteurs peuvent utiliser. L'hypothèse d'une baisse tendancielle du niveau des nappes d'aujourd'hui à 2100 est ensuite adoptée, ce qui implique que les niveaux d'eau disponible diminuent aussi tendanciellement chaque année. Nous avons décidé de ne pas adopter cette méthodologie pour caractériser le phénomène sécheresse, car nous estimons qu'elle souligne davantage l'écart structurel entre disponibilité de la ressource et consommation totale sur le territoire (notons qu'il y a bel et bien un déficit structurel sur le département) qu'une sécheresse qui est un phénomène relativement ponctuel.

Nous avons choisi de reprendre la relation entre jours de restriction et quantités d'eau prélevables. Néanmoins nous abandonnons partiellement la relation avec le niveau des nappes pour raisonner en probabilité d'occurrence d'année sèche. Notre démarche est la suivante : l'année 2023, durant laquelle les Pyrénées-Orientales ont connu une sécheresse particulièrement intense, est prise comme année étalon. Il existe plusieurs niveaux d'alertes qui sont fonction des niveaux piézométriques : l'alerte, l'alerte renforcée et la situation de crise. Chacun de ces niveaux d'alertes impliquent des restrictions sur l'utilisation de l'eau pour l'irrigation. Ces restrictions dépendent des cultures et du type d'irrigation utilisé. En tout, il y a eu 129 jours en alerte renforcée⁷ et 236 jours en crise⁸ en 2023. Ces périodes de restrictions administratives sont confrontées aux périodes d'irrigation (renseignées par le memento BRL) pour caractériser notre l'année sèche type de notre modèle. Par exemple, l'intégralité de la période d'irrigation des vergers s'est faite en période de crise en 2023, les restrictions sont donc de -50%. Nous renseignons dans le tableau 5 les restrictions par culture en situation de crise (voir arrêté préfectoral cadre⁹) pour illustrer les restrictions qui s'imposent sur la grande majorité de notre année sèche type :

Cultures	Irrigation localisée	Irrigation gravitaire	Irrigation par aspersion
Vergers	-50%	-80%	/
Vignes	-50%	-80%	/
Maraîchage	-30 à -40% (sous serre)	-80%	/
Céréales	-100%	-100%	-100%

TABLE 5 – Restrictions sur les prélèvements en eau en période de crise
(Source : Arrêté préfectoral cadre n°DDTM/SER/2018150-0002)

7. -25% de prélèvement possible pour l'irrigation en goutte-à-goutte par rapport aux prélèvements moyens des cinq années précédentes, -50% pour les cultures irriguées en gravitaire

8. -50% pour l'irrigation en goutte-à-goutte

9. [://www.pyrenees-orientales.gouv.fr/contenu/telechargement/22565/169375/file/2018_05_30_arrete_cadre_secheresse_sig](http://www.pyrenees-orientales.gouv.fr/contenu/telechargement/22565/169375/file/2018_05_30_arrete_cadre_secheresse_sig)

Ces restrictions en prélèvement sont considérées comme un proxy de la disponibilité effective de l'eau en année sèche. Dans notre modèle, une année sèche sera caractérisée par des besoins en eau partiellement pourvus. Par exemple, les vergers ne seront arrosés qu'à hauteur de 50% de leur besoin en eau. Notons ici que ce raisonnement s'appuie sur l'hypothèse selon laquelle les agriculteurs respectent les restrictions dictées par l'arrêté cadre sécheresse. Dans les faits, il est très difficile de faire respecter ces directives car les forages individuels sans compteurs sont nombreux sur la plaine du Roussillon.

Dans notre modèle une année sèche pourra advenir selon différentes périodes de retour. Nous adoptons une posture de précaution car deux sources d'incertitudes nous empêchent de choisir un chiffre prédéfini : la sécheresse qu'ont connu les Pyrénées-Orientales était inédite et n'a pas été encore assez étudiée pour que sa période de retour associée soit arrêtée ; les méthodes de calculs des périodes de retour se basent sur des séries de données passées, or le changement climatique va nécessairement augmenter la probabilité d'occurrence de ce type de sécheresse. Compte tenu de ces incertitudes, nous choisissons de produire plusieurs résultats avec différents scénarios de période de retour et laissons le choix aux acteurs de terrains de choisir le scénario adéquat pour leur prise de décision.

L'impact d'une sécheresse sur les quantités d'eau disponibles pour l'irrigation ayant été modélisée, il faut maintenant expliquer comment la diminution de l'eau disponible pour les cultures diminue les rendements, c'est l'objet de la sous partie suivante.

2.2.3 Lien entre disponibilité de l'eau et rendement : les courbes de réponse à l'eau

Pour traduire la diminution des quantités d'eau disponible en perte de rendement nous utilisons des courbes de réponses à l'eau (CRE) issue de du projet TALANO-WATER¹⁰, un projet de recherche visant à explorer les voies d'adaptation de l'agriculture méditerranéenne au changement climatique et à la rareté de l'eau. Dans le cadre de ce projet, des courbes de réponses à l'eau ont été développées via le modèle agronomique SIMETAW [Mancosu et al., 2016]. Ce sont des fonctions ayant pour intrant des quantités d'eau d'irrigation et pour extrants un rendement en pourcentage du rendement maximum potentiel. La figure 5 est un exemple de courbe de réponse à l'eau pour la culture de l'olivier sur le Narbonnais Audois. L'intérêt d'une telle courbe est de s'affranchir de la relation linéaire que l'on est tenté d'adopter quand on met en relation l'eau et les rendements, d'autant plus a montré qu'elle serait fausse [Doorenbos, 1980]. Les rendements sont davantage lié logarithmiquement à l'eau d'irrigation qui leur est apportée et, surtout, un volume d'eau d'irrigation nul n'est pas synonyme de rendements nuls. Ainsi on peut voir ici que l'olivier atteint un maximum de production (en quantité) à environ 600 mm par hectare et par an, mais une diminution de 50% des volumes d'irrigation ne provoque qu'une diminution d'environ 11% des rendements. Ces courbes sont issues d'un modèle alliant des considérations hydrologiques et agronomiques propre à la région de l'Aude, mais des sous régions sont aussi caractérisées et nous avons considéré que les résultats associés au territoire du Narbonnais pouvaient être transposés à notre terrain d'étude. Ainsi, pour les deux cultures les plus présentes dans sur le territoire, la vigne et les vergers, nous utilisons ces courbes de réponse pour transposer l'impact sur l'eau

10. <https://talanoa-water-france.hub.inrae.fr/>

d'une sécheresse en impact sur les rendements.

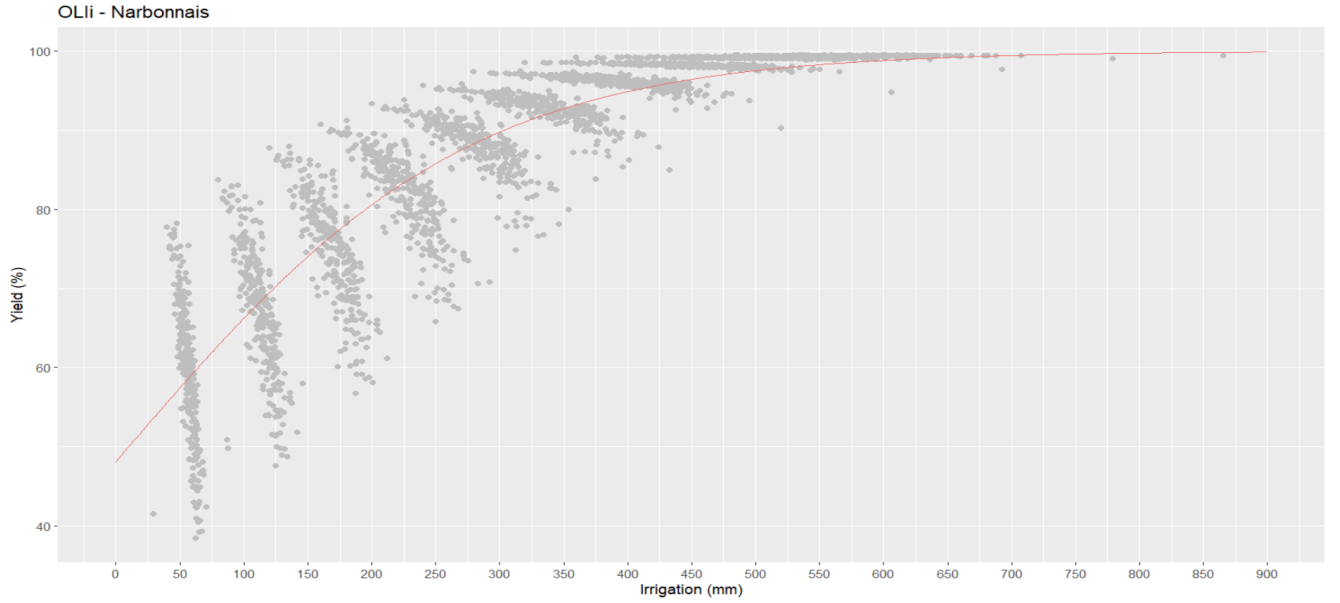


FIGURE 5 – Courbe de réponse à l'eau de l'olivier du Narbonnais

Dans la mesure où le projet TALANO-WATER ne travaille pas directement sur la sécheresse mais sur l'adaptation au changement climatique, leurs courbes reposent sur des modèles agronomiques paramétrés sur des années à pluviométries variées. Or, pour notre étude spécifiquement, il est plus pertinent de travailler sur des courbes de réponses calibrées sur des années à faible pluviométrie, caractérisant des années sèches. En effet, les années humides vont tirer la courbe de réponse vers le haut en surestimant les rendements potentiels associés aux volumes d'eau d'irrigation car pendant une année humide les rendements sont globalement plus importants qu'en moyenne et, a fortiori, un faible volume d'eau d'irrigation peut être compensé par une pluviométrie plus importante. Or ce n'est pas ce que nous voulons représenter dans notre étude. Grâce à l'aide et à la coopération de l'équipe de TALANO-WATER, nous avons pu accéder au modèle et aux données utilisées pour construire ces courbes, et nous avons fait le choix de les retracer à partir d'un nuage de point représentant les 50% des points ayant la pluviométrie la plus faible dans le nuage de points initial. C'est l'opération que l'on peut voir en comparant les figures 6 et 7 : les courbes sont tracées grâce à une régression non linéaire en suivant l'équation 2 proposée par Graveline and Merel [2014].

$$y_i(w_i) = \frac{a_i}{1 + \exp\left(\frac{-(w_i - w_{i0})}{b_i}\right)} \quad (2)$$

Notre approche est différente pour les deux autres cultures de notre étude. En ce qui concerne les céréales, il n'y a pas de dérogation associée pour bénéficier d'un minimum d'eau d'irrigation. Les cultures céréalières sont complètement privées d'eau pendant les années sèches telles que nous les décrivons dans notre étude et nous estimons que dans de pareilles conditions climatiques les pertes sont totales. Nous considérons donc que 100% des rendements potentiels céréaliers sont perdus pendant une sécheresse. Pour la culture maraîchère c'est différent puisqu'il est prévu

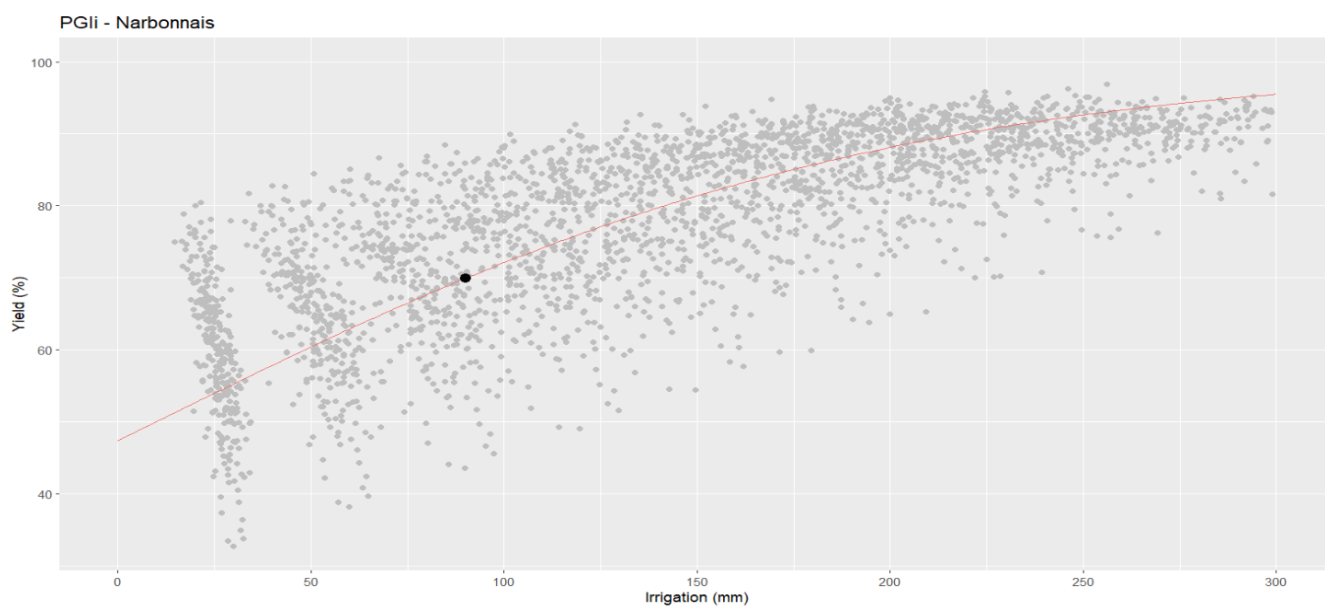


FIGURE 6 – Courbe de réponse à l'eau de la vigne IGP du Narbonnais :
Construction à partir d'années représentant des années sèches et des années humides

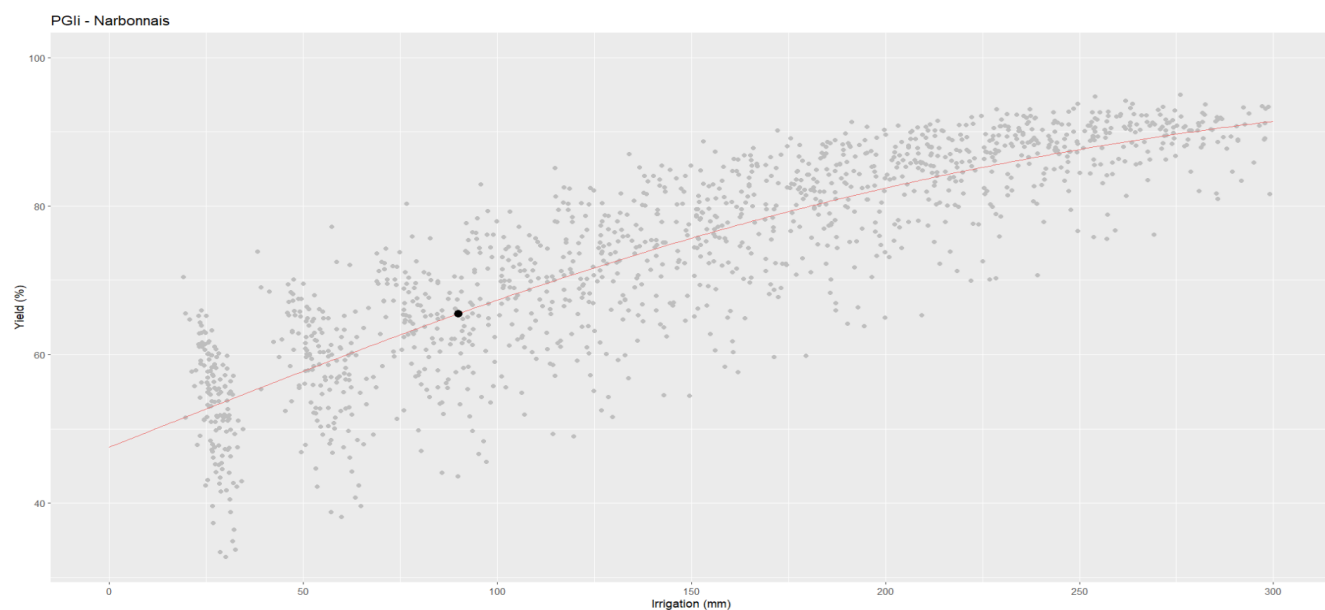


FIGURE 7 – Courbe de réponse à l'eau de la vigne IGP du Narbonnais :
Construction à partir des années sèches seulement

des volumes d'eau différents selon les pratiques. Cependant les pratiques des agriculteurs sont telles que nous adoptons pour cette culture une relation linéaire entre volume d'eau d'irrigation et rendements agricoles. En effet, il est ressorti durant les dialogues entre les agriculteurs et la chambre d'agriculture auxquels nous avons pu assister que les maraîchers ont tendance à anticiper les quantités d'eau qui seront disponibles et à ajuster le nombre d'hectares consacrés à cette culture. Ainsi, si une restriction de 50% leur est appliquée ils préféreront planter la moitié de ce qu'ils produiraient en temps normal plutôt que d'irriguer à moitié l'intégralité de

leurs cultures. De ce fait, nous choisissons dans ce cas une relation linéaire entre rendement du maraîchage et eau d'irrigation puisque la quantité d'eau disponible conditionne directement le nombre d'hectare qui va être consacré au maraîchage.

Cultures	Lien Eau-Rendement	Impact sur l'eau	Impact sur les rendements
Vergers	Logarithmique	-50%	-19%
Vignes	Logarithmique	-50%	-17%
Maraîchage	Linéaire	-69%	-69%
Céréales	Linéaire	-100%	-100%

TABLE 6 – Impacts induits par la sécheresse sur les restrictions d'eau et les rendements

Finalement, nous pouvons lire dans le tableau 6 que durant un année sèche, comme définit dans notre modèle, les cultures les plus touchées sont les céréales et le maraîchage. Concernant la vigne et l'arboriculture, les deux cultures les plus présentes sur notre territoire voient leurs rendements baisser de respectivement 17% et 19%.

2.2.4 Sur la différence entre parcelles irriguées et non irriguées

La sécheresse n'impacte pas seulement le rendement des parcelles irriguées. Les parcelles non irriguées la subissent elles aussi puisque la pluviométrie, la réserve utile du sol et la quantité d'eau dans les rivières diminuent, ce qui représente les seuls apports en eau pour ces cultures. Il y a un débat sur l'impact relatif de la sécheresse sur ces cultures par rapport au même impact sur les cultures irriguées. D'un côté les cultures non irriguées ont tendance à moins produire mais à être plus robustes que leurs homologues irriguées car elles sont habituées à de faibles quantités d'eau et ont souvent développées un réseau racinaire plus profond. Ce premier point prête à penser que l'impact de la sécheresse est moindre sur les parcelles non irriguées. D'un autre côté, une sécheresse longue affecte durablement la quantité d'eau dans les sols, réduit les masses d'eau dans les nappes alluviales et leurs rivières, et diminue drastiquement la pluviométrie. L'habitude à de faibles quantités d'eau ne prévient pas de l'absence quasi-totale d'apport en eau, et les parcelles non-irriguées n'ont pas de moyen de se maintenir artificiellement dans le cas où la sécheresse serait trop violente. Ce second point nous fait dire que les parcelles non irriguées sont plus vulnérables à la sécheresse. Dans la mesure où les zones d'irrigation ont tendance à augmenter (Nouveau réseaux à Cabanac pour alimenter de la vigne, projet de REUT à Argelès-sur-Mer, extension de l'ASA de Baixas) et compte tenu du nombre d'arrachage de parcelles viticoles non-irriguées, nous faisons le choix de considérer que l'impact de la sécheresse sur les parcelles non irriguées de notre terrain d'étude est au moins aussi important que celui sur les parcelles irriguées. Ayant fait cette hypothèse, nous pouvons appliquer au moins le même ratio de perte économique sur les parcelles non irriguées que sur les parcelles irriguées. Les dommages induits par une sécheresse sur le terrain d'étude est donc la somme des dommages sur toutes les parcelles du terrain considéré. Cependant, seuls les dommages sur les parcelles irriguées sont considérés comme « évitables », car ce sont ces parcelles qui pourront bénéficier des volumes mis à disposition par un potentiel projet de sécurisation de l'eau.

2.3 Analyse coûts bénéfiques

L'analyse coûts bénéfiques est une méthode permettant de fournir des données quantitatives qui évalue la rentabilité économique d'un projet d'investissement [OECD, 2018]. Comme l'explique Loubier et Declercq (2014), la rentabilité « économique » s'oppose à la rentabilité « financière » dans le sens où « l'on se place délibérément du point de vue de la collectivité et non du point de vue d'un agent particulier. La collectivité est entendue ici au sens large. Ce sont tous les acteurs concernés directement ou indirectement par le projet : porteurs du projet lui-même, usagers, financeurs et "l'Etat", garant de l'intérêt général, et en particulier dans les cas de REUSE, du respect de l'environnement » [Loubier and Declercq, 2014]

2.3.1 La méthode des dommages évités

Il existe plusieurs moyens de calculer les bénéfices lors d'une ACB comme le montre succinctement notre revue de la littérature. Dans notre cas, à savoir l'évaluation de projet d'adaptation contre la sécheresse, nous considérons que la méthode la plus adaptée soit la méthode des dommages évités car celle-ci présente le double avantage de fournir une information sur le coût induit d'une telle catastrophe et une autre sur les bénéfices potentiels d'un projet de lutte contre cette même catastrophe. La méthode repose sur l'estimation de dommages et la comparaison entre un scénario contrefactuel et un scénario de mise en place du projet. Pour comprendre la méthode il faut d'abord expliciter quatre notions clés :

- Les Dommages Annuels (DA) sont la différence entre le revenu total du terrain d'étude pour une année moyenne et le même revenu calculé pour une année sèche. Dans notre cas ce sont les valeurs ajoutées agrégées de toutes les parcelles du terrain qui sont considérées comme revenu. Les DA peuvent être calculés indépendamment de l'analyse coûts bénéfiques.
- Les Dommages Evités Annuels (DEA) représentent la différence entre les DA calculés dans un scénario sans projet et ceux d'un scénario où le projet est installé. La figure 8 propose une illustration graphique de la méthode.
- La Valeur Actuelle Nette (VAN) est l'indicateur synthétique de l'ACB. Elle permet de mettre en balance les coûts et les bénéfices d'un projet pour juger de sa pertinence, elle est calculée de la manière suivante :

$$VAN = -C_0 + \sum_{i=1}^n \frac{1}{(1+r)^i} (B_i - C_i) \quad (3)$$

avec C_0 : le coût initial du projet (ici au temps $i = 0$), B_i : les bénéfices liés au projet (attendus à la période i), C_i : les coûts de fonctionnement du projet (à la période i), n : l'horizon temporel du projet, r : le taux d'actualisation. Notons que dans notre cas les DEA constituent les bénéfices liés au projet.

- Le taux d'actualisation : concept mathématique permettant de prendre en compte la préférence des individus pour le présent et de l'aversion à l'inégalité de consommation entre les générations [Hardelin and Marical, 2011]. Il permet de ramener les valeurs futures en

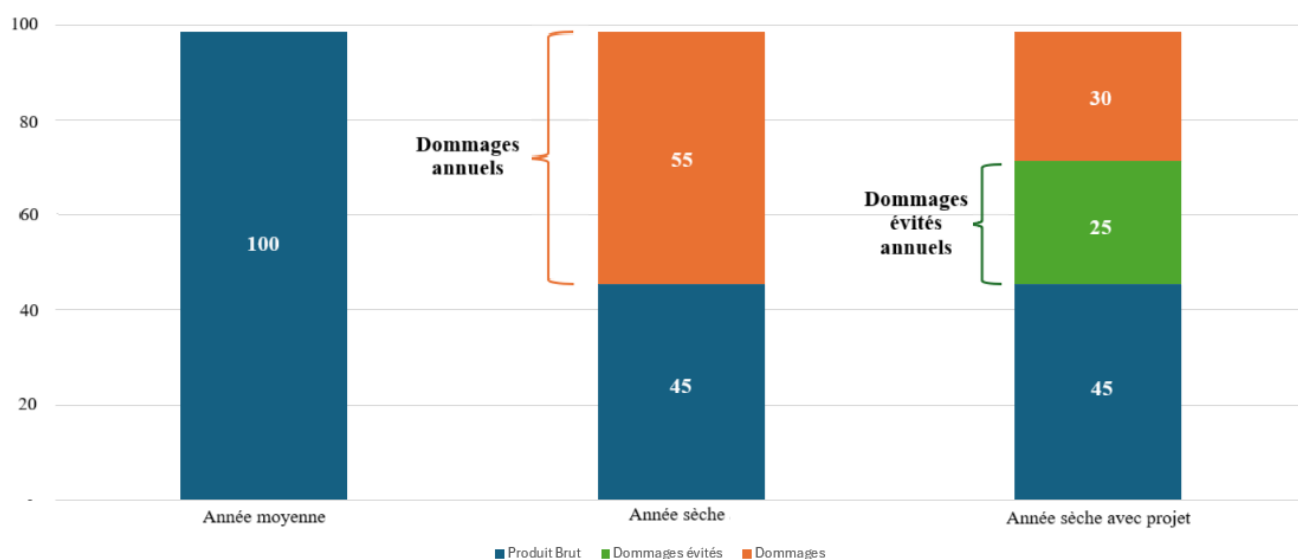


FIGURE 8 – Illustration de la méthode des dommages évités

valeurs présentes, c'est en quelque sorte le taux de substitution entre le futur et le présent.

Dans notre cas, il est fixé à 2.5%.

Pour revenir à notre cas, nous avons jusqu'ici produit plusieurs données : à chaque parcelle agricole est associée une culture, un rendement physique et économique et des quantités d'eau nécessaires pour obtenir ce rendement ; chaque parcelle peut subir l'impact d'une sécheresse selon son assolement, celle-ci a un effet sur l'approvisionnement des besoins en eau et donc sur les rendements. L'occurrence d'une année sèche implique donc un moindre rendement sur les parcelles irriguées, puisque l'eau d'irrigation y est moins disponible. Cette diminution de rendement réduit également la valeur ajoutée, puisque ces deux données sont liées comme nous l'avons vu dans la partie 2.1.3. La différence entre la valeur ajoutée agrégée sur tout un terrain d'étude pour une année à pluviométrie normale (on dira « année type » ou « année moyenne ») et la valeur ajoutée pour une année sèche constitue les DA. Ces dommages sont considérés comme partiellement évitables car, dans le cas où un projet de sécurisation de l'eau verrait le jour, l'apport en eau supplémentaire qu'il mettrait à disposition pourrait subvenir aux besoins non pourvus et donc pallier la perte économique. Seules les parcelles irriguées sont susceptibles d'utiliser ces volumes d'eaux, les DEA ne sont donc possibles que sur celles-ci.

2.3.2 Méthode de calcul des bénéfices totaux : période de retour et actualisation

Les dommages et dommages évités sont calculés pour un événement type (dans notre cas la sécheresse 2023). Les bénéfices associés aux projets vont varier en fonction du nombre d'occurrence d'une sécheresse sur la durée de vie du projet. La période de retour est un concept qui définit la moyenne de long terme du temps qui sépare un événement d'une intensité donnée d'un événement d'une intensité égale ou supérieure. Dans notre cas, la période de retour sera le nombre d'année qui sépare nos années sèches telles que nous les avons défini précédemment.

Plus la période de retour est faible, plus le nombre de sécheresse sera élevé, et plus les dommages évités liés à un projet augmente car celui-ci permet de prévenir plus de pertes.

Dans une ACB, tous les coûts et bénéfices sont soumis à un taux d'inflation et à un taux d'actualisation défini au préalable. Dans notre cas, l'événement sécheresse type donnera des dommages évités identiques pour toutes les années sèches occurrentes. Cependant, les taux d'actualisation et d'inflation sont pondérés par l'année d'occurrence de la sécheresse, donc les montant dommages évités pris en compte dans l'ACB seront différents. Ainsi, si le projet permet des dommages évités de 100 et qu'une sécheresse advient en année 5, les dommages comptabilisé seront de $100 * (\frac{1.02}{1.025})^5 = 97.58$, alors que si elle advient en année 20 les bénéfices ne seront que de $100 * (\frac{1.02}{1.025})^{20} = 90.68$.

Remarquons que dans la littérature, l'usage est de caractériser plusieurs types d'événements ayant des intensités et des probabilités d'occurrence différentes. C'est ce que font Erdlenbruch et al. [2008] dans leur ACB de la protection contre les inondations. Dans notre cas, le manque de données et le caractère inédit de la sécheresse de 2022-2024 des Pyrénées-Orientales nous fait raisonner sur la répétition dans le temps d'un même événement, à intensité constante mais pour plusieurs probabilités d'occurrences différentes.

3 Application à nos terrains d'étude

Notre méthodologie permet d'évaluer de manière indifférenciée tous les projets dits de « sécurisation de l'eau », c'est-à-dire des projets mettant à disposition des volumes d'eau supplémentaires en période de sécheresse. Ces volumes sont bénéfiques car ils évitent des dommages sur la rentabilité des exploitations agricoles, il faut cependant investir au préalable pour les rendre effectivement disponibles. Dans la suite de ce travail nous allons utiliser notre méthodologie pour évaluer deux projets de sécurisation de l'eau existants dans les Pyrénées-Orientales. Le premier porte sur la REUT dans la commune de Clairà, le second est une amélioration du réseau d'irrigation sur la partie aval de la vallée de l'Agly.

3.1 Le projet de REUT à Clairà

Ce travail s'inscrit dans le programme de recherche *Water Occitanie* qui étudie, entre autre, la pertinence de la REUT dans la Région. Dans le cadre de ce programme, un Living Lab est hébergé à Clairà et plusieurs études pluridisciplinaires ont été menées pour étudier les tenants et aboutissants de la mise en place de la REUT dans cette commune d'un point de vue sociologique, géographique et, dans notre cas, économique. Plusieurs stages ont déjà rendu des résultats sur la faisabilité de ce projet. Dans son mémoire, Martin Coll [2024] a proposé une cartographie des parcelles irriguées de la commune et a évalué si la qualité de l'eau en sortie de STEP était satisfaisante pour les différentes cultures de la commune. Il a conclu que la REUT pouvait effectivement « réduire en partie la vulnérabilité agricole et territoriale en tant que solution de court et de moyen terme pour répondre à l'aléa sécheresse », à condition que les agriculteurs adoptent des pratiques « barrières » pour des raisons sanitaires. D'autres stages ont aussi été menés pour évaluer la perception et l'acceptabilité des acteurs de terrain vis-à-vis de cette solution. Il en sort que « la REUT apparaît comme une solution technique imprégnée de paradoxes » [Gournet, 2024]. En effet, il semble que les parties prenantes soient globalement d'accord sur l'utilité et la faisabilité de cette solution, mais il reste des incertitudes sur plusieurs points : la gestion, la pertinence économique, les risques de pollution des nappes et d'effets rebonds. Notre étude s'inscrit donc dans cette analyse globale et contribue au seul volet économique.

3.2 Caractérisation du secteur agricole de la commune

La commune de Clairà compte 742 hectares de parcelles productives d'après les chiffres de la Chambre d'Agriculture des Pyrénées-Orientales. La carte 9 permet de voir la disparité des cultures et leur localisation, on remarque que les cultures principales sont la vigne et l'arboriculture (la quasi totalité étant des abricotiers). La carte 10 nous donne des informations sur la valeur ajoutée des parcelles. Les vergers et le maraîchage sont les cultures à plus forte valeur ajoutée. Comme on peut le voir sur la carte 11, ce sont aussi ces cultures qui sont les plus demandeuses en eau d'irrigation, contrairement aux vignes qui ne sont pas, ou peu, irriguées.

En somme, durant une année à pluviométrie moyenne, l'agriculture Clairanencque présente un produit brut de 6.6 millions d'euros pour des besoins en eau totaux s'élevant à 1.4 million de mètres cube. Cela représente 2.3 millions de valeur ajoutée dont 68% se fait sur des parcelles

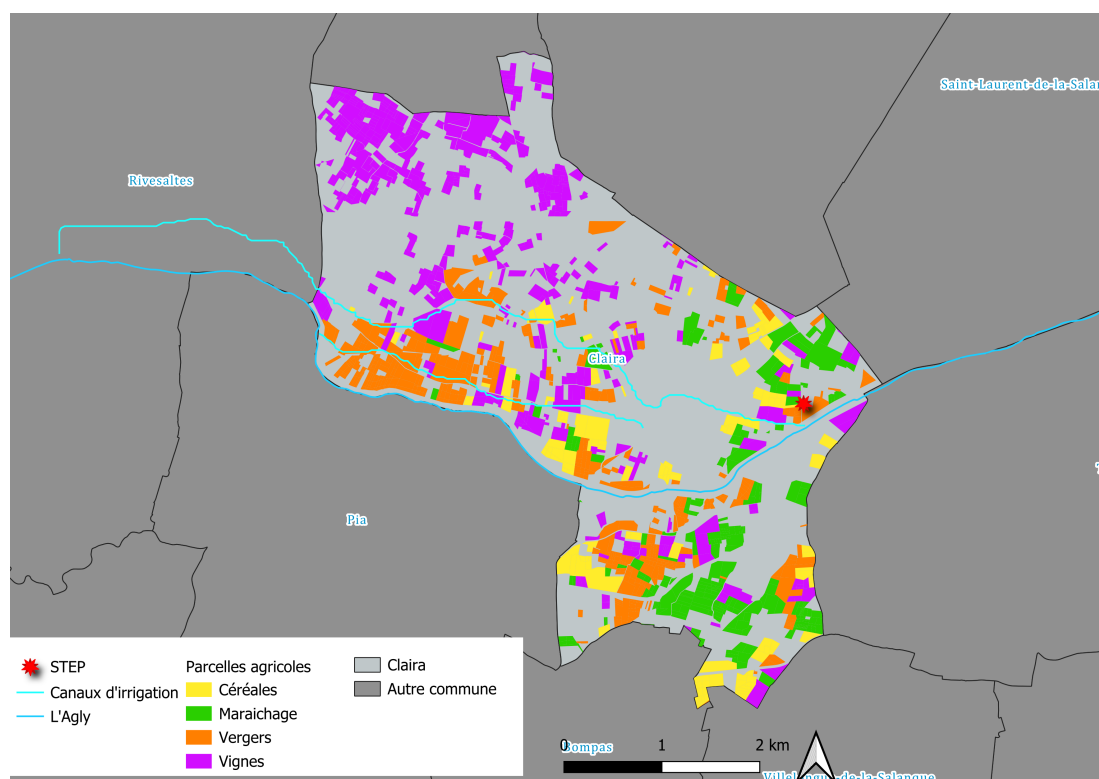


FIGURE 9 – Assolement sur la commune de Clairà

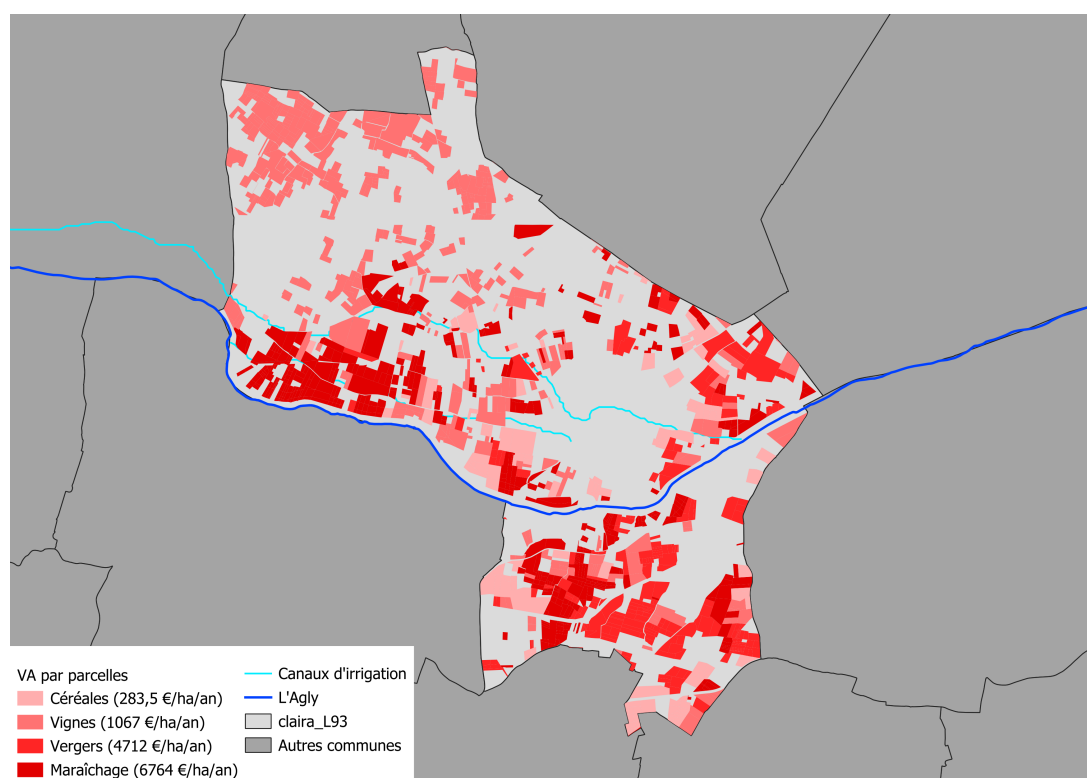


FIGURE 10 – Valeur ajoutée selon les parcelles

irriguées. La part irriguée de la valeur ajoutée est plus importante que la part des surfaces irriguées dans le total des surfaces (54%), cela s'explique par le fait que les cultures à forte valeur

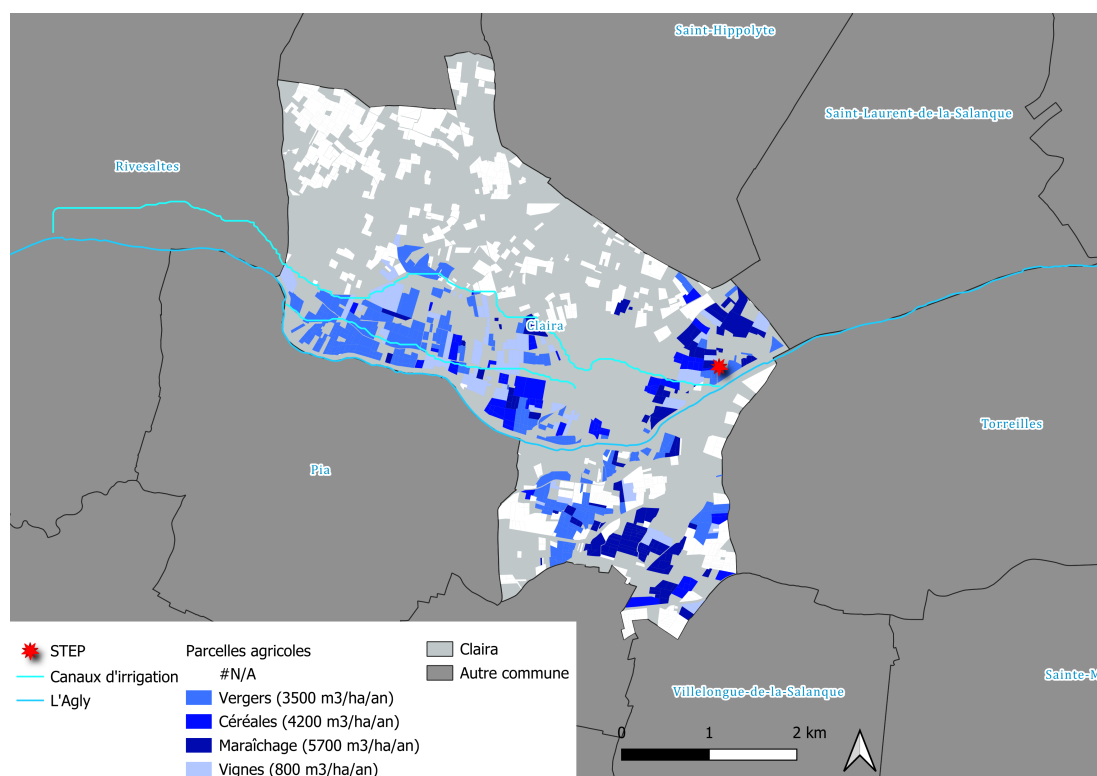


FIGURE 11 – Besoins en eau d'irrigation selon les parcelles

ajoutée (Maraîchage et Vergers) sont majoritairement irriguées. Dans le tableau 7 on trouve les chiffres principaux des différentes bases de données pour la commune de Clairà.

	CA66	RPG 2020	RA 2020	BNPE 2020
Hectares	742 (54% irrigué)	440	379 (47% irrigué)	/
PB (M€) ou PBS (M€)	6.6	/	4.8	/
Valeur Ajoutée (M€)	2.3	/	/	/
BEEi ou Prélèvement (Mm ³)	1.4	/	/	1.1

TABLE 7 – Comparaison des données hydriques et agricoles pour Clairà

Comme vu précédemment, la différence de surface agricole utile consacrée à l'agriculture (hors cultures fourragères et jachère) est très importante entre les bases de données (7). En utilisant la base de données de la Chambre d'Agriculture nous obtiendrons mécaniquement un produit brut total plus important qu'en utilisant les autres bases de données, puisque celui-ci est directement calculé à partir du nombre d'hectare. Il en va de même pour la valeur ajoutée et, plus crucial encore dans notre étude, pour les dommages et dommages évités potentiels qui sont la base de notre ACB. De ce fait, nous explicitons ici qu'il existe une incertitude dans notre travail liée au choix de base de données sur les surfaces et l'assolement. Notons par ailleurs que, puisque nous avons choisi la base de données recensant le plus de parcelles, le risque de notre étude est de surévaluer les dommages évités et donc les bénéfices liés à notre projet. Ceci étant dit, une analyse d'incertitude et de sensibilité est aussi réalisée dans le cadre de ce travail. Pour comprendre l'impact d'un changement de données d'entrée dans notre analyse, nous renvoyons

le.a. lecteur.ice vers la partie 4 de ce rapport.

3.2.1 Dommages induits, dommages évités et besoins en eau non-pourvus

La carte 12 présente l'impact d'une sécheresse sur les parcelles agricoles de Clairà. Les cultures les plus sévèrement touchées sont les céréales, du fait de leur technique d'irrigation (les restrictions sont plus sévères pour l'aspersion que pour l'irrigation localisée) et le maraîchage. En ce qui concerne les vignes et vergers, les conséquences de la sécheresse se traduisent par une baisse des rendements de respectivement 17% et 19%. Dans les faits, lors de l'année 2023, au cœur de la sécheresse, les syndicats agricoles ont déclaré que les pertes observées sur l'arboriculture était de l'ordre de 15%. En somme, les dommages calculés par notre modèle lors d'une année sèche s'élèvent à 778 898 €, ce qui représente 34% de la valeur ajoutée perdue par rapport à une année moyenne. Or sur la totalité de ce manque à gagner 528 759 € le sont sur des parcelles qui sont irriguées, c'est-à-dire qu'elles pourraient bénéficier d'eau mise à disposition par une infrastructure de sécurisation telle que de l'Eau Usée Traitée (EUT). Ce chiffre de 528 759 € constitue donc les DEA sur la commune de Clairà, c'est-à-dire les bénéfices que pourraient générer un projet de sécurisation de l'eau. Le déficit sur les besoins en eau des cultures s'élevant à 886 131 m³, nous considérons que toute quantité d'eau apportée par un projet à une parcelle déficitaire durant la période d'irrigation générerait un bénéfice potentiel calculé au prorata de ce qu'il apporte en eau par rapport au déficit total.

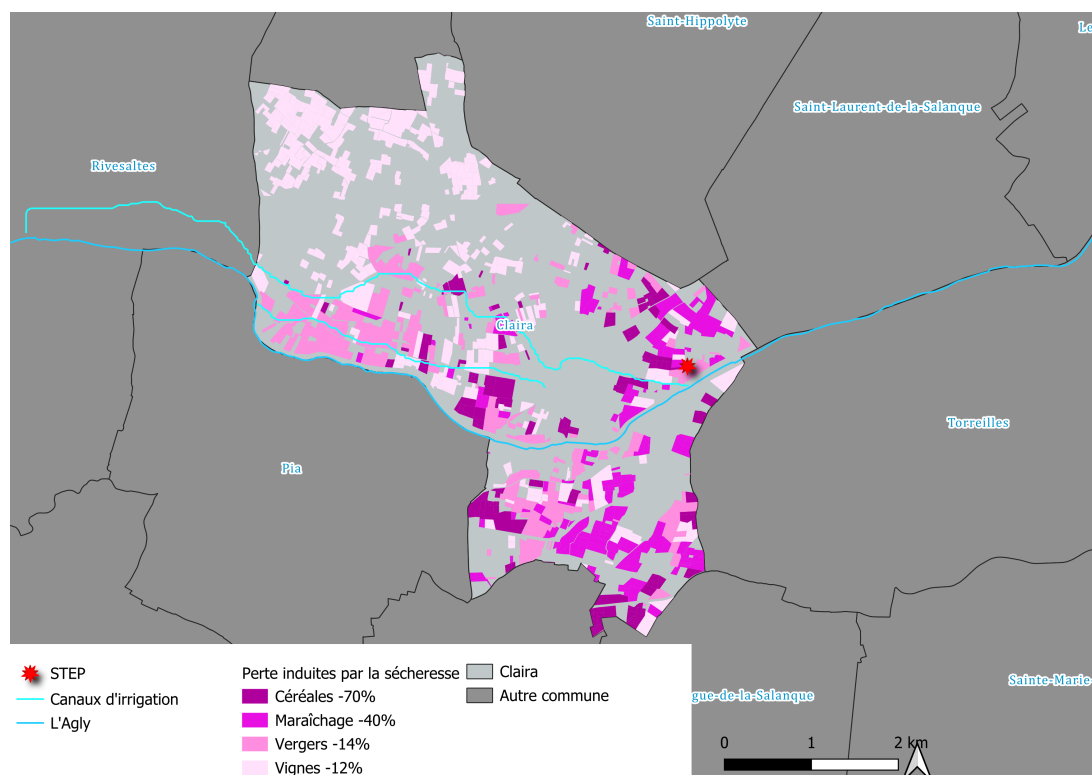


FIGURE 12 – Réduction des rendements suite à une sécheresse à Clairà

3.2.2 Présentation de nos scénarios

La commune de Claira a été l'une des premières communes des Pyrénées-Orientales à considérer la REUT comme une solution potentielle au manque d'eau structurel ou en cas de sécheresse. Si le projet a été clôturé après l'étude de faisabilité pour des raisons techniques aussi bien que politiques, la commune a demandé que cette solution soit étudiée à nouveau, en mettant l'accent sur les enjeux économiques.

La précédente étude [IREEDD, 2023], menée conjointement par ImaGeau et par l'Institut des Ressources Environnementales et du Développement Durable (IREEDD), deux bureaux d'étude avec lesquels nous avons pu échanger et comparer nos résultats, étudiait cinq scénarios de valorisation de la REUT sur la commune. Seul leur scénario 4, portant sur l'utilisation d'eaux usées traitées pour l'agriculture nous intéresse dans la cadre de ce travail. Dans la mesure où nos conclusions divergent, il nous est important d'identifier au préalable les raisons qui pourraient expliquer ces différences :

- La modélisation de la sécheresse est différente : comme nous l'avons expliqué dans la partie 2.2.2 notre méthode repose sur le concept de période de retour de la sécheresse quand celle de l'IREEDD repose sur une relation linéaire reliant le niveau des nappes, les restrictions administratives et les volumes d'eau disponibles.
- Nous avons considérés quatre type de cultures différentes quand la précédente étude s'appuie sur une culture moyenne représentative de toutes celles cultivées des Pyrénées-Orientales
- Le temps de travail n'est pas le même : un stage de 6 mois consacré pleinement à la compréhension d'un seul sujet et au développement d'un seul modèle permet d'appréhender un sujet différemment qu'avec un temps et des ressources limités que peuvent connaître les bureaux d'études
- La chronologie : Notre travail a grandement bénéficié du retour d'expérience du bureau d'étude lui-même et des acteurs de terrain ayant eu accès à leur travail.

Ces facteurs sont les principales explications des divergences de résultats que l'on peut trouver en comparant nos deux rapports. Le débat entre méthode et résultats permet d'identifier les faiblesses et d'y remédier.

Nous évaluons le projet de REUT de Claira à la lumière du scénario où l'eau mise à disposition par la STEP profiterait à l'agriculture, en opposition aux scénarios d'hydrocurage, de borne incendie ou de nettoyage des voiries qui ont aussi été évalués par l'IREEDD. D'après l'étude de faisabilité, la station d'épuration pourrait mettre à disposition 200 000 m³ sur une année, pour un coût total estimé sur 30 ans (investissement et fonctionnement) de 660 000 €. Les coûts d'investissement, s'élevant à 184 000 €, comprennent d'après la précédente étude un poste de relèvement, 50 mètres de canalisations, des analyses de qualité de l'eau supplémentaires, la suppression pour envoyer l'eau dans la nappe et les frais de dossier. Le stockage de l'eau, qui est accumulée toute l'année mais dont le besoin se manifeste durant la période d'irrigation seulement, se ferait par réinjection dans la nappe. Ces informations constituent la base du scénario

rio dans lequel l’IREEDD et ImaGeau produisent un scénario de REUT à des fins agricoles, dans lequel ils prévoient une mise à disposition possible d’un volume d’EUT de 95 000 m³, correspondant aux besoins des forages considérés comme assez proche de la STEP pour pouvoir bénéficier de la recharge de la nappe phréatique. Ces mêmes informations constitueront dans notre cas le scénario de base duquel découleront plusieurs extensions visant à améliorer cette étude. Notons ici que nous ne prenons pas en compte le coût des pratiques « barrières » identifiées par Martin Coll dans son mémoire [Coll, 2024], qui est supporté par les agriculteurs pour que leur utilisation de l’EUT rentre dans les normes sanitaires et que leurs produits puissent être commercialisés.

Grâce à notre approche par SIG et à la spatialisation des parcelles nous avons pu identifier une incohérence dans le rapport IREEDD-ImaGeau qui a pour conséquence la sous-estimation des coûts d’investissement du projet REUT. En effet, à la lecture de l’analyse hydrogéologique nous pouvons constater que l’écoulement de l’EUT dans la nappe après réinjection se ferait d’ouest en est, en suivant le sens d’écoulement de l’Agly, et qu’elle rejoindra la nappe alluviale en quelques semaines. Outre le problème de stockage que cela suscite, il s’avère que le « périmètre de recharge », définit dans l’étude ImaGeau/IREEDD par les forages pouvant bénéficier de la recharge de la nappe, se trouve à l’ouest de la station, ce qui ne correspond pas au chemin que prendrait l’eau d’après l’analyse hydrogéologique. L’inadéquation spatiale entre les parcelles ayant des besoins en eau en année sèche (à l’ouest de la STEP) et la zone effective de recharge de la nappe phréatique (à l’est de la STEP) est illustré sur la carte 13, sur laquelle sont présentes les parcelles qui serait sujettes à des besoins en eau non-pourvus lors d’une année sèche (en violet) et l’écoulement prévu par ImaGeau et l’IREEDD lors de la recharge de la nappe. De ce fait, et parce qu’il n’est pas prévu d’infrastructures supplémentaires pour amener artificiellement de l’eau à l’ouest de la STEP, nous concluons que les coûts d’investissement sont sous-estimés.

Nous proposons d’étudier les scénarios d’investissement suivants pour pallier ce problème :

- Le scénario 1 sera le scénario ImaGeau IREEDD : un coût total estimé à 660 000 € sur toute la période d’exploitation (en l’occurrence 30 ans) pour un volume d’eau supplémentaire de 95 000 m³ par an (correspondants aux besoins déclarés des deux forages considérés par IREEDD/ImaGeau comme assez proches de la STEP pour bénéficier de la recharge de la nappe), mis à disposition pour l’agriculture et non-soumis aux restrictions administratives.
- Le scénario 2 est différent du premier en ceci qu’il se voit ajouter 200 000 € d’investissement supplémentaire. Celui-ci correspond à la construction d’une infrastructure de transfert d’eau reliant les forages que la précédente étude considérait dans le « périmètre de recharge ». Ces coûts sont calculés en mesurant la distance entre la STEP et les forages via un logiciel SIG et en prenant le coût au mètre des tuyaux déjà présent dans le scénario 1. Notons que nous faisons fi des coûts supplémentaires d’énergie qu’il faudra mobiliser pour envoyer de l’eau en amont de la STEP.
- Le scénario 3 est un scénario très hypothétique qui ne tient pas compte de sa faisabilité physique ou sociale. Nous imaginons un tuyau de 5 kilomètres qui lierait la STEP au canal Saint-Pierre. Celui-ci alimente les parcelles irriguées de Clairac via une ASA. Ce scénario

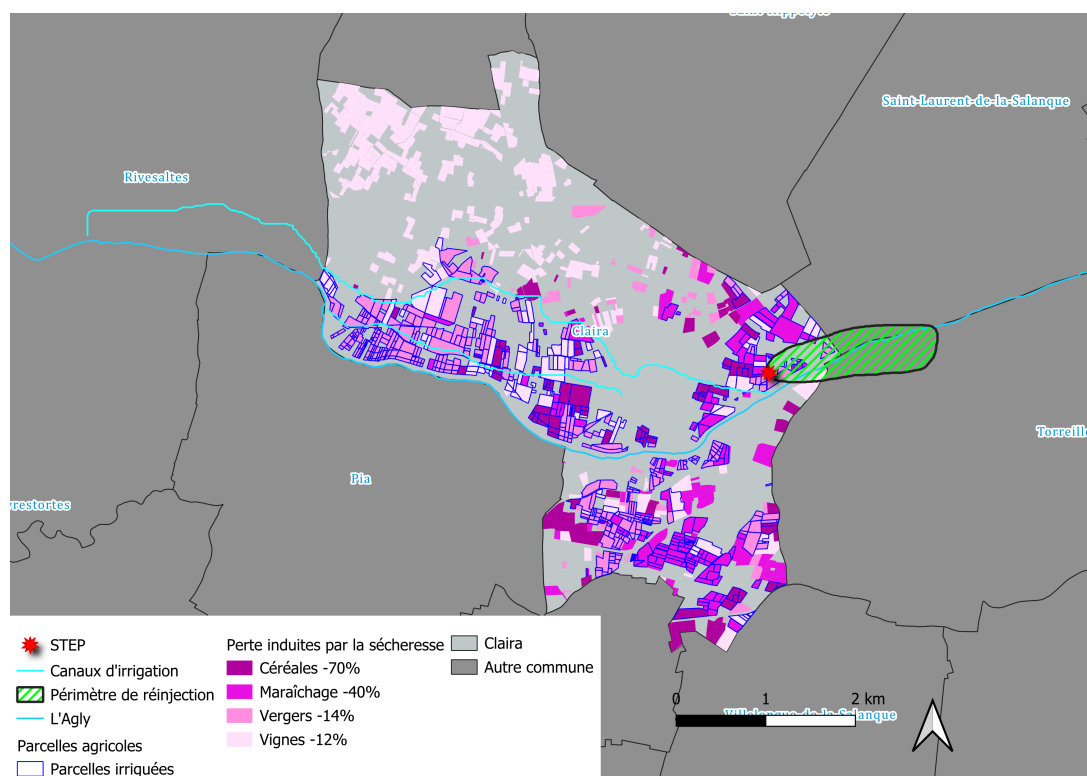


FIGURE 13 – Impact sécheresse à Clairà et visualisation de la réinjection dans la nappe

est imaginé pour maximiser les volumes mis à disposition par la STEP en période de sécheresse. Nous estimons le coût supplémentaire à 1 137 000 € pour un volume annuel de 200 000 m³. Ce coût correspond aux coûts de tuyaux supplémentaires réduits des coûts du scénario initial non nécessaires dans ce scénarios (comme les coûts de surpression pour envoyer l'eau dans la nappe).

- Le scénario 4 étudie la rentabilité d'un projet ne bénéficiant pas seulement aux parcelles de la commune de Clairà mais aux parcelles autour de la STEP, quelque soit la commune. Elle reprend les coûts du scénario 1 et mets à disposition 95 000 m³ à toute les parcelles comprises dans un rayon de 1500m autour de la STEP. Se faisant, le périmètre des parcelles qui ont besoin d'eau coïncide avec l'écoulement théorique de la recharge de la nappe. Notons que ce scénario est construit théoriquement pour donner un ordre de grandeur, il ne repose sur aucune étude géographique ou économique attestant des BEEi ou de la capacité des exploitations à pouvoir effectivement bénéficier de l'EUT.

La tableau 8 résume les résultats obtenus lors du calcul de la VAN pour les quatre scénarios et pour différentes périodes de retour de la sécheresse.

période de retour (années)	Scénario 1	Scénario 2	Scénario 3	Scénario 4
1	0.74	0.53	1.05	0.92
2	0.10	-0.19	-0.3	0.15
3	-0.16	-0.35	-0.91	-0.15
5	-0.38	-0.57	-1.18	-0.34
10	-0.55	-0.77	-1.61	-0.50
15	-0.57	-0.79	-1.74	-0.58
20	-0.58	-0.76	-1.78	-0.61

TABLE 8 – Récapitulatif des VAN par scénario et par période de retour, en millions d’euros

Lecture : La VAN du projet REUT dans le scénario 1 et pour une période de retour égale à 1 est positive. Cela signifie que dans ces conditions, à savoir qu’une sécheresse de type 2023 adienne chaque année pour l’entièreté de la durée de vie du projet, le projet est rentable économiquement.

3.2.3 Résultats

Nous constatons que le projet de REUT sur la commune de Clairia n’est rentable que dans une petite partie des cas et pour des hypothèses très contraignantes. Pour l’ensemble des scénarios étudiés, seuls six cas présentent une VAN positive, c’est-à-dire que, pour ces six cas seulement, l’investissement dans une infrastructure de REUT permet d’éviter plus de dommages économiques sur le secteur agricole que ce qu’elle coûte à la collectivité. Parmi ces six cas, deux sont issus de scénario 1 qui, nous l’avons vu, présente une sous-évaluation des coûts d’investissement, le scénario 2 existe pour rectifier ce défaut. Après rectification, il ne reste que quatre scénarios de rentabilité économique pour le projet de REUT à Clairia, ces quatre scénarios existent pour des périodes de retour égales à 1 ou 2. Ce sont des scénarios très pessimistes à horizon 30 ans et, même si le retour d’expérience sur la sécheresse 2022-2024 n’est pas encore disponible, ces scénarios sont très improbables pour les 30 années à venir. Dans tous les autres cas la VAN est négative, ce qui implique que le projet n’est pas rentable économiquement. Faisons ici la remarque que la VAN est une information sur la pertinence économique d’un projet, une collectivité peut avoir de bonnes raisons, sociales ou politiques, d’adopter un projet dont l’ACB a rendu un résultat défavorable. Prenons pour illustration le cas du scénario 3 avec une période de retour 20 ans. Pour cette période de retour une année sèche de type 2023 arrivera vraisemblablement une seule fois durant la durée de vie du projet (30 ans). La VAN présente un déficit de 1.78 millions d’euros, le choix politique est alors le suivant : est-il acceptable d’adopter un projet déficitaire à hauteur de 1.78 millions d’euros pour permettre aux agriculteurs de Clairia de continuer à produire sans pertes lors d’une sécheresse ? Une réponse positive à cette question pourrait être motivée par plusieurs facteurs que nous ne prenons pas en compte dans notre analyse comme la quête de la souveraineté alimentaire, la lutte contre les incendies, la préservation des paysages, etc. Rappelons que, si une négociation sur la répartition des coûts entre les acteurs est possible, ce type de projet est majoritairement financé par des aides financières publiques pouvant aller jusqu’à 80% du coût total d’investissement ¹¹.

11. <https://professionnels.ofb.fr/fr/node/165>

En nous appuyant sur ce travail nous concluons que le projet de réutilisation des eaux usées traitées de la commune de Clairac n'est pas rentable. Ce résultat est obtenu alors même que nous avons fait des hypothèses optimistes sur les coûts d'investissements en n'ajoutant pas les coûts supplémentaires d'énergie dans les scénarios 2 et 3. De plus, un problème plus global à la REUT dans les terres (en opposition à la REUT en littoral) réside dans le fait que la réutilisation par l'agriculture d'EUT normalement rejetées dans le milieu provoque un effet d'éviction sur les usages qui en sont habituellement faits, qu'ils soient économiques ou écologiques, car l'eau non rendue par la STEP ne peut plus être utilisée en aval. En effet, pour les STEP situées dans les terres, l'eau rejetée est utilisée en aval en soutien d'étiage, en recharge des nappes, en services écosystémiques, etc. Notre analyse ne prend pas en compte l'arrêt de ces usages potentiels comme coûts liés à la REUT, elle aura donc tendance à sous-estimer les coûts, à surestimer la VAN, ce qui renforce notre conclusion de non-rentabilité.

3.3 Le projet *Maillage* sur la vallée de l'Agly

Les parcelles agricoles irriguées de la plaine du Roussillon sont alimentées par l'eau des nappes plio-quaternaires et l'eau de la rivière Agly. Depuis la construction du barrage de Caramany en amont de la plaine, le débit de l'Agly est régulé et doit être réparti entre trois principaux usages : l'alimentation en eau potable (AEP), l'irrigation agricole et le débit réservé, c'est-à-dire le débit minimum qui doit couler dans la rivière pour assurer la bonne santé des écosystèmes aquatiques et la continuité écologique. Une des spécificités de ce cours d'eau réside dans le fait qu'une partie significative du débit de l'Agly n'atteint pas l'aval de la plaine pour des raisons géologiques. En effet, l'Agly passe par un système karstique, c'est-à-dire une roche calcaire pleine de cavités par lesquelles l'eau s'infiltre dans le sol et sort du lit de la rivière. Cette eau, qui *in fine* alimente la nappe pliocène et un étang en aval de la plaine, ne peut pas être directement utilisée par le secteur agricole ou par les communes pour s'alimenter en eau. Du point de vue de certains acteurs cette eau est perdue et il est nécessaire d'installer une infrastructure pour court-circuiter le karst et optimiser les usages de chacun des mètres cubes lâchés par le barrage. C'est dans ce contexte qu'à vu le jour le projet « *Maillage* », porté par la Chambre d'Agriculture, qui a pour but de contourner le karst des Corbières et de mettre à disposition des irrigants l'eau initialement « perdue ». Notons dès à présent que tous les acteurs de la Région ne sont pas en faveur de ce projet du fait du détournement de masses d'eau qui sont par ailleurs utiles dans d'autres secteurs que la plaine du Roussillon et dans d'autres secteurs que l'agriculture, en l'occurrence dans l'alimentation de la nappe pliocène qui est la principale source d'eau potable de la région [BRGM, 2004]. D'autre part, l'écoulement dans le karst alimente *in fine* l'étang de Leucate dont l'écosystème pâtirait d'une diminution du débit provoqué par le projet de contournement. En ce sens, le risque d'une opposition d'associations environnementales est à prévoir.

En adoptant le point de vue du secteur agricole, ce projet aura pour effet d'augmenter les masses d'eau disponibles, notamment en période de sécheresse. Le contournement du karst permettra au barrage de lâcher moins d'eau pour couvrir les mêmes besoins en année sèche. L'eau initialement prévue pour le karst constituera donc une ressource supplémentaire qui peut être utilisée pour pallier le déficit provoqué par une sécheresse. Il s'agit donc d'un projet qui rentre dans notre cadre d'analyse, en cela qu'il met à disposition de l'eau supplémentaire pour

l'agriculture lors d'une sécheresse pour éviter des pertes de rendements.

3.3.1 Caractérisation du secteur agricole de la vallée

Comme nous pouvons le voir sur la figure 14 la vallée de l'Agly se caractérise par une production principalement viticole. Les cultures à hautes valeurs ajoutées que sont l'arboriculture et le maraîchage sont situées en aval du territoire. Le périmètre que nous avons choisi correspond à l'ensemble des communes sur lesquelles se trouvent des parcelles susceptibles de bénéficier de l'eau supplémentaire mise à disposition par le projet de la Chambre d'Agriculture. Comme on peut le voir sur la figure 4 les parcelles agricoles irriguées sont globalement groupées, cela renvoie au périmètre des ASA actives sur la plaine et aux quelques parcelles hors ASA qui bénéficient d'un forage individuel recensé.

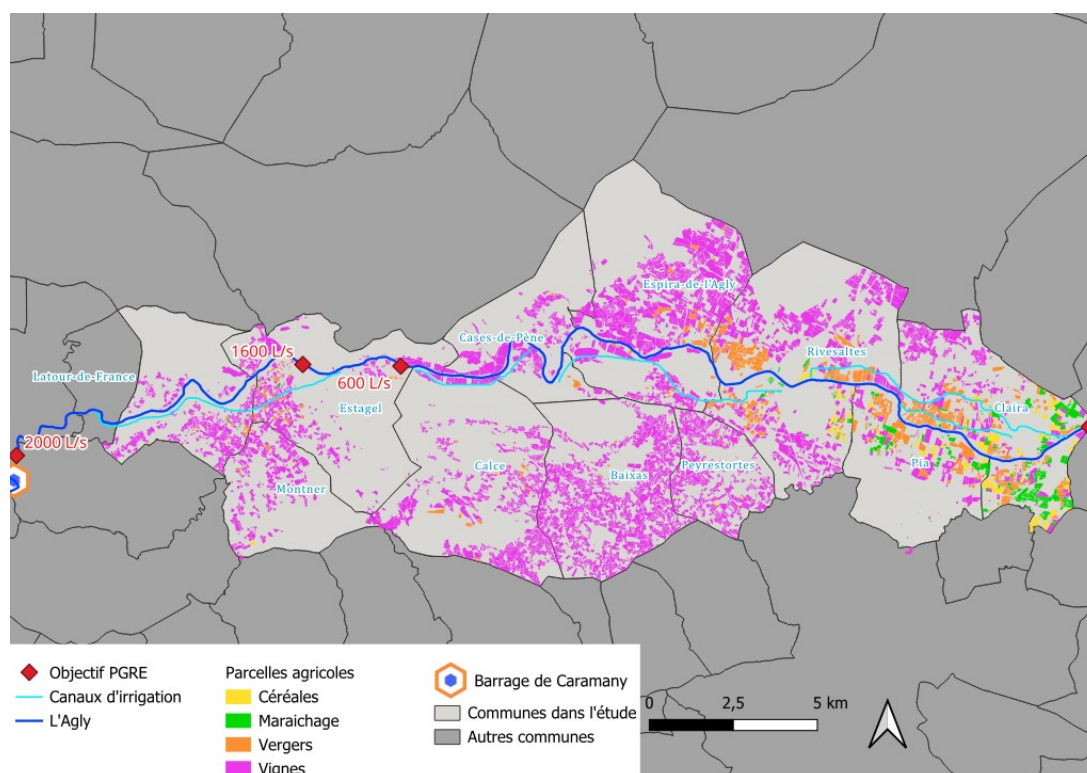


FIGURE 14 – Carte de l'assolement sur la vallée de l'Agly

	CA66	RPG 2020	RA 2020	BNPE 2020
Ha	5451 (26% irrig)	5519	6691 (16% irrig)	
PB (M€)	30.59		33.101	
VA (M€)	8.06			
BEE (Mm ³)	3.54			7.3

TABLE 9 – Comparaison des données hydriques et agricoles sur la vallée de l'Agly

En ce qui concerne la différence entre les besoins en eau¹² calculés dans notre modèle et les prélèvements effectivement observés, ces chiffres sont cohérents si on fait abstraction de notre connaissance sur la fiabilité des chiffres BNPE. Un prélèvement de 7.3 millions de mètres cubes

12. Pour les différences entre les données agricoles, nous renvoyons le.a lecteur.ice à la partie 2.1

pour une consommation finale de la plante de 3.54 millions de mètres cubes correspondrait à une efficience du réseau de 48%, ce qui n'est pas aberrant compte tenu du réseau et des techniques d'irrigation adoptées sur le territoire. Encore une fois, la cohérence entre les résultats à l'échelle du bassin versant et ceux de la commune est mise en cause puisque les prélèvements étaient inférieurs aux besoins sur la commune de Clairac. Cela peut s'expliquer par les méthodes de comptabilisation adoptées par la BNPE, celle-ci attribut le prélèvement à la commune où se situe la prise d'eau, hors celle-ci n'est pas forcément commune où l'eau est effectivement consommée. Une commune très consommatrice, par exemple où se situe un ASA, peut aussi être une commune qui ne prélève aucun mètre cube du point de vue de la BNPE, car la prise d'eau se trouve dans la commune voisine.

Les cartes 15 et 16 présentent respectivement les besoins en eau et l'intensité en valeur ajoutée par parcelle. Sur ce périmètre le produit brut total calculé s'élève à 30.59 millions d'euros pour une valeur ajoutée totale de 8.06 millions d'euros. La part de valeur ajoutée irriguée est de 46%, ce chiffre diminue par rapport au périmètre de Clairac, ce qui s'explique par la diminution de la part des deux cultures à fortes valeurs ajoutées dans le total des parcelles irriguées.

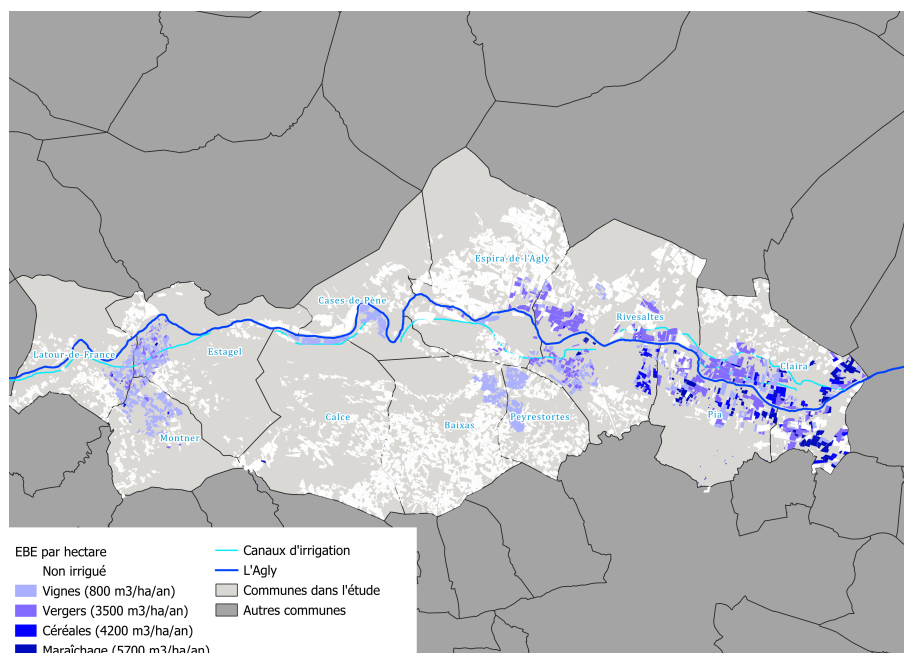


FIGURE 15 – BEEi selon les parcelles sur la vallée de l'Agly

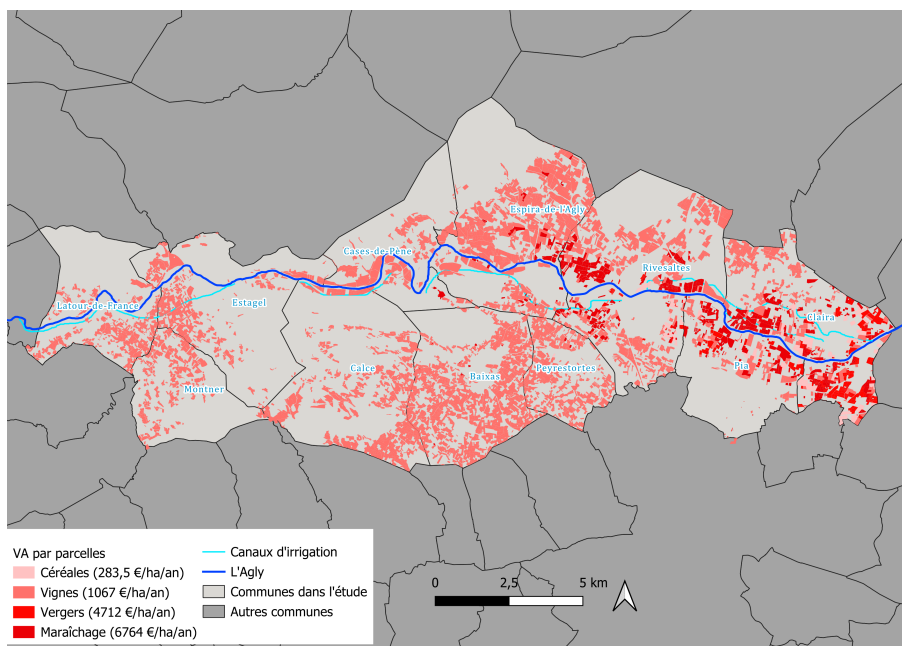


FIGURE 16 – Valeur ajoutée selon les parcelles sur la vallée de l'Agly

3.3.2 Les pertes de fonds sur la vallée de l'Agly

Pour l'analyse de ce projet il faut ajouter à notre calcul de l'impact de la sécheresse une dimension qui ne touchait pas la Commune de Clair, les pertes de fonds. Une sécheresse aussi intense que celle advenue entre 2022 et 2024 peut provoquer la mort des cultures sur plusieurs hectares. D'après la chambre d'agriculture, il y a eu en 2023 une cinquantaine d'hectares de vergers morts dû au manque d'eau dans les Pyrénées-Orientales¹³. Il est nécessaire que ce risque soit pris en compte dans notre analyse car un des bénéfices que pourrait apporter le projet « *Maillage* » est la sauvegarde de ces vergers via une irrigation « de survie ». Pour prendre en compte cette nouvelle problématique nous avons suivi la procédure suivante :

- Nous estimons que les 50 hectares de vergers morts sont dispersés de manière homogène sur tout le département.
- Le nombre d'hectare concerné sur notre secteur est calculé au prorata de la part de surface consacrée aux vergers sur notre terrain d'étude dans la surface totale consacrée aux vergers dans les Pyrénées-Orientales. Cela représente environ 10 hectares sur notre terrain d'étude
- Nous faisons l'hypothèse que l'hectare mort est immédiatement remplacé par une nouvelle culture, productive six ans après la plantation.
- Le coût total engendré par la perte d'un hectare de vergers est la somme du coût de plantation de la nouvelle culture et du manque à gagner subit par l'absence de vergers productifs jusqu'à ce que les nouveaux plants soient matures. Cela représente environ 56 000 € par hectare

Deux remarques sur la cohérence de notre démarche sont nécessaires. La première porte sur le fait que les pertes de fonds n'ont pas été considérées dans l'étude sur la commune de Clair car d'après les acteurs avec lesquels nous avons échangés, il n'y a pas eu de vergers qui soient

13. information issue d'un entretien avec la chambre d'agriculture

morts durant l'épisode de sécheresse de 2022 sur cette commune. Ceci s'explique par le fait qu'une grande partie des parcelles agricoles Clairanencques ont accès à un forage individuel et que la commune se situe assez en aval dans le bassin versant pour que les puits aient été moins touchés par les assecs que les communes en amont, les arboriculteurs ont donc pu irriguer leurs cultures. La seconde remarque explique pourquoi nous avons considéré les pertes de fonds sur la culture arboricole seulement. Rappelons que les quatre groupes de culture étudiées dans notre étude sont l'arboriculture, la viticulture, le maraîchage et les céréales. Les deux dernières ne sont pas des cultures pérennes, c'est-à-dire que les producteurs ont une marge de manœuvre tous les ans et qu'ils ne perdent en pratique que le résultat d'une année si une sécheresse impacte ses rendements. Pour la viticulture et l'arboriculture au contraire, la mort des plants représente un coût important puisqu'il s'agit de replanter et d'attendre qu'ils redeviennent productifs pendant plusieurs années. Nous avons choisi de ne retenir comme coûts liés aux pertes de fonds la culture arboricole seulement, car celle-ci a une forte valeur ajoutée et qu'elle est attractive du point de vue des agriculteurs. La viticulture connaît elle une perte d'attractivité en ceci qu'elle génère moins de valeurs ajoutées, que le marché français se contracte depuis plusieurs années et que le manque d'eau génère des difficultés de production. D'après un rapport de la chambre d'agriculture en 2023¹⁴, plus de 600 hectares de vignes ont été arrachés sur la saison 2022-2023. Les campagnes d'arrachages se poursuivent et la causalité entre sécheresse et arrachage est difficile à mesurer car la situation des viticulteurs de la région était déjà préoccupante avant 2022 pour des raisons différentes au seul manque d'eau. Nous avons donc fait le choix de ne pas considérer des pertes de fonds liées à la sécheresse pour la vignes car on ne sait pas si une mise à disposition de volumes d'eau supplémentaire réduira le nombre d'hectares arrachés.

3.3.3 Financement du projet *Maillage* et Résultats

Le projet porté par la chambre d'agriculture comporte trois scénarios de financement couvrant différentes parties de notre territoire. L'étude de faisabilité étant en cours de production au moment de la rédaction de ce mémoire, nous ne pouvons pas donner de coûts totaux exhaustifs liés à la mise en place du projet *Maillage*. Cependant, il existe un chiffrage partiel des coûts d'investissement, allant de 6M€ à 20M€ selon les scénarios. Les coûts d'adduction, de raccordement au réseau existant et d'achat du foncier ne sont pas pris en compte dans ces chiffres. Nous pouvons tout de même commencer à raisonner à partir de ces chiffres en sachant qu'il représentent la fourchette basse des coûts réels puisqu'il faudra y ajouter une partie des coûts d'investissement et la totalité des coûts de fonctionnement.

En ce qui concerne les bénéfices, les dommages annuels calculés s'élèvent à 2.38 millions d'euros. Parmi ces dommages, 1.499 millions d'euros sont issus de parcelles irriguées ou sont des pertes de fonds, ce chiffre constitue donc les dommages évités, c'est-à-dire les bénéfices de l'ACB sur le projet « *Maillage* ». Le tableau 10 donne les seuls bénéfices potentiels que peut rapporter le projet en fonction de la période de retour. Les acteurs de terrains pourront s'appuyer sur ces chiffres pour prendre leurs décisions au moment où les coûts auront été complètement chiffrés et

14. https://po.chambres-agriculture.fr/fileadmin/user_upload/267_chambre_dagriculture_-_pyrenees-orientales/FICHIERS/COLLECTIONS_DE_FICHIERS/Millesimes/MILLESIME_2023-web-CA66.pdf

que la période de retour de ce type de sécheresse aura été étudiée. Notons que pour engendrer ces bénéfices, le projet devra être en capacité de combler le manque d'eau moyen calculé qui s'élève à plus de 2 millions de mètres cubes. Les bénéfices potentiels induits par la mise en place du projet ne dépassant pas les 5 millions d'euros dans les cas où la période de retour est supérieure à 10 ans, nous pouvons en l'état actuel des choses conclure à la non rentabilité du projet *Maillage* dans les cas où les années sèches de type 2023 adviendraient tous les 15 ans ou plus. Il semble même que le projet *Maillage* soit calibré pour préparer le territoire à ce que des sécheresses d'intensité similaire à 2023 adviennent au moins tous les 5 ans, car même pour une période de retour de 10 ans les bénéfices potentiels seraient trop faibles pour compenser les coûts d'investissement totaux additionnés des coûts de fonctionnement (nous considérons que les coûts de fonctionnement vont nécessairement dépasser 1.01 M€ sur trente ans).

Période de retour (années)	Bénéfices potentiels (M€)
1	71.66
2	35.74
3	23.77
5	14.19
10	7.01
15	4.62
20	2.33

TABLE 10 – Dommages évités pour un projet de sécurisation de l'eau sur la vallée de l'Agly, en millions d'euros

4 Analyse d’incertitude et de sensibilité

Notre analyse repose sur un certain nombre de données d’entrées qui impactent les résultats de manière significative et ce indépendamment de la structure du modèle, or ces données peuvent être soumises à de l’incertitude. Nous avons vu plus haut l’hétérogénéité des données spatiales, mais l’incertitude existe pour beaucoup de données utilisées comme inputs lors de notre analyse. Pour appuyer la robustesse de notre travail il faut mettre en lumière à quel point la variation des données d’entrée implique une variation du résultat final et quels sont les inputs qui sont responsables de la plus grande incertitude. La partie qui suit a pour objet l’explication de la méthodologie et la production de résultats d’une analyse d’incertitude et de sensibilité sur notre modèle. Pour ce faire, nous suivons la méthodologie proposée par Grelot et al. [2013] sur l’incertitude dans les études ACB-DE, et nous aidons du livre de Saltelli [2008]

4.1 Analyse d’incertitude

Plusieurs paramètres utilisés dans notre modèle sont soumis à une incertitude. Celle-ci peut être liée à des contraintes présentes (les besoins en eau d’irrigation des plantes sont plus ou moins élevés selon différentes sources d’information) ou future (ces besoins en eau vont probablement augmenter du fait du changement climatique). La méthode Monte-Carlo, que nous utilisons, propose de probabiliser tous les paramètres incertains, c’est-à-dire de ne plus les caractériser par un scalaire fixe mais par une distribution de probabilité dans laquelle le modèle tire aléatoirement une valeur. Une fois tous les paramètres tirés, le modèle peut tourner normalement, produire un résultat puis recommencer un grand nombre de fois. Ceci permet d’obtenir un résultat de nature probabiliste qui communique de l’information supplémentaire, notamment sur l’étendue des états du monde possibles et sur le niveau de risque de tomber sur un état du monde.

4.1.1 Choix des bornes

La première étape de ce travail réside dans le choix des bornes qui vont limiter nos paramètres. Nous avons choisi de travailler avec des lois de probabilité triangulaires, en opposition à des lois normales, pour s’affranchir des cas extrêmes qui impacteront fortement les résultats finaux tout en ayant une très faible probabilité d’occurrence. De plus, la loi triangulaire (définie par une valeur moyenne, une borne supérieure et une borne inférieure) est plus adaptée qu’une loi normale dans notre cas puisqu’on peut légitimement borner des valeurs physiques telles que les besoins en eau ou les rendements agricoles. Ainsi, voici les choix des bornes que nous avons fait pour l’ensemble de nos paramètres incertains :

- Sur les surfaces nous faisons varier de $\pm 20\%$ les surfaces autour des valeurs de la base de données de la chambre d’agriculture pour l’étude sur Clairia (5% pour celle sur le bassin versant), à surface totale constante, en utilisant le maraîchage comme culture d’ajustement.
- Sur les besoins en eau d’irrigation (BEEi), les données BRL sont prises comme valeur moyenne puis bornées à dire d’experts.

Input probabilisé	Unité	Culture	Borne inférieure	Mode	Borne supérieure
Surface Clairia	ha	Vignes	-20%	292	20%
	ha	Vergers	-20%	204	20%
	ha	Céréales	-20%	104	20%
	ha	Maraîchage		Ajustement	
Surface BV	ha	Vignes	-5%	4463	5%
	ha	Vergers	-5%	623	5%
	ha	Céréales	-5%	161	5%
	ha	Maraîchage		Ajustement	
BEE	m ³ /ha	Vignes	300	800	1000
	m ³ /ha	Vergers	2600	3520	7000
	m ³ /ha	Céréales	1140	4195	6500
	m ³ /ha	Maraîchage	5000	5700	7000
Rendements	hL/ha	Vignes	16	29	42
	Kg/ha	Vergers	7720	8500	15200
	Kg/ha	Céréales	3500	5400	9400
	Kg/ha	Maraîchage	7200	11400	13600
Ratio VA/PB		Vignes	0,25	0,28	0,31
		Vergers	0,30	0,33	0,35
		Céréales	0,19	0,25	0,34
		Maraîchage	0,20	0,345	0,52

TABLE 11 – Inputs probabilisés par cultures

- Pour les rendements, nous avons étudié les chroniques de rendement de la Statistique Agricole Annuelle (SAA) pour la période 2010-2023. Les trois indicateurs des lois triangulaires pour chaque culture correspondent aux rendements maximums, minimums et moyens sur cette période.
- Concernant les ratios pour extraire la valeur ajoutée du produit brut, nous avons choisi de les borner à hauteur de 20% autour de la valeur initiale.
- Pour les coûts des infrastructures, nous suivons l'hypothèse adoptée par Grelot et al. [2013], qui prend en compte que le coût des projets a davantage tendance à être majoré que minoré. Les bornes sont donc comprises en 90% du coût annoncé et 120% du coût annoncé.
- En ce qui concerne les pertes de fonds, nous bornons la surface touchée par les pertes de fonds en vergers entre 10 ha et 50 ha, la mode étant établi à 20 ha. La borne supérieure correspond alors à la totalité des pertes déclarées par la Chambre d'agriculture sur l'ensemble du département.

Notons que plusieurs indicateurs ne sont pas probabilisés dans notre étude. Ce choix s'explique aussi au cas par cas :

- Pour le taux d'actualisation, nous suivons les choix de Grelot et al. [2013] : « Il est également considéré, dans notre exemple, que la convention est forte sur ce taux et qu'aucune incertitude n'est considérée autour de cette valeur »
- L'horizon temporel est aussi une convention, elle peut être modifiée mais il n'existe pas

d'incertitude à proprement parler sur cette valeur.

- L'incertitude sur la manière de transposer le manque d'eau en dommage sur les rendements agricoles existe, cependant nous ne sommes pas en capacité de la prendre en compte car cette transposition repose sur un modèle agro-hydrologique que nous ne maîtrisons pas.

4.1.2 Résultats sur Clairia

Une fois l'ensemble des variables traitées, nous faisons tourner notre modèle un grand nombre de fois (en l'occurrence 10 000) pour obtenir un résultat probabiliste. Chaque fois que notre modèle génère une VAN pour les projets sur Clairia et sur la vallée de l'Agly, il le fait avec un éventail de données tirées aléatoirement dans le panel que nous venons de décrire.

Sur le projet de REUT à Clairia, nous obtenons 28 densités de probabilités décrivant les VAN pour chacun des 4 scénarios et pour les 7 périodes de retour considérées. Si l'analyse d'incertitude améliore la qualité de l'information fournie par l'ACB, les conclusions ne sont pas fondamentalement modifiées et les recommandations seront sensiblement similaires sur les 4 scénarios étudiés, nous nous permettons donc de ne commenter que les résultats d'un seul des quatre scénarios, par soucis de lisibilité et d'intelligibilité.

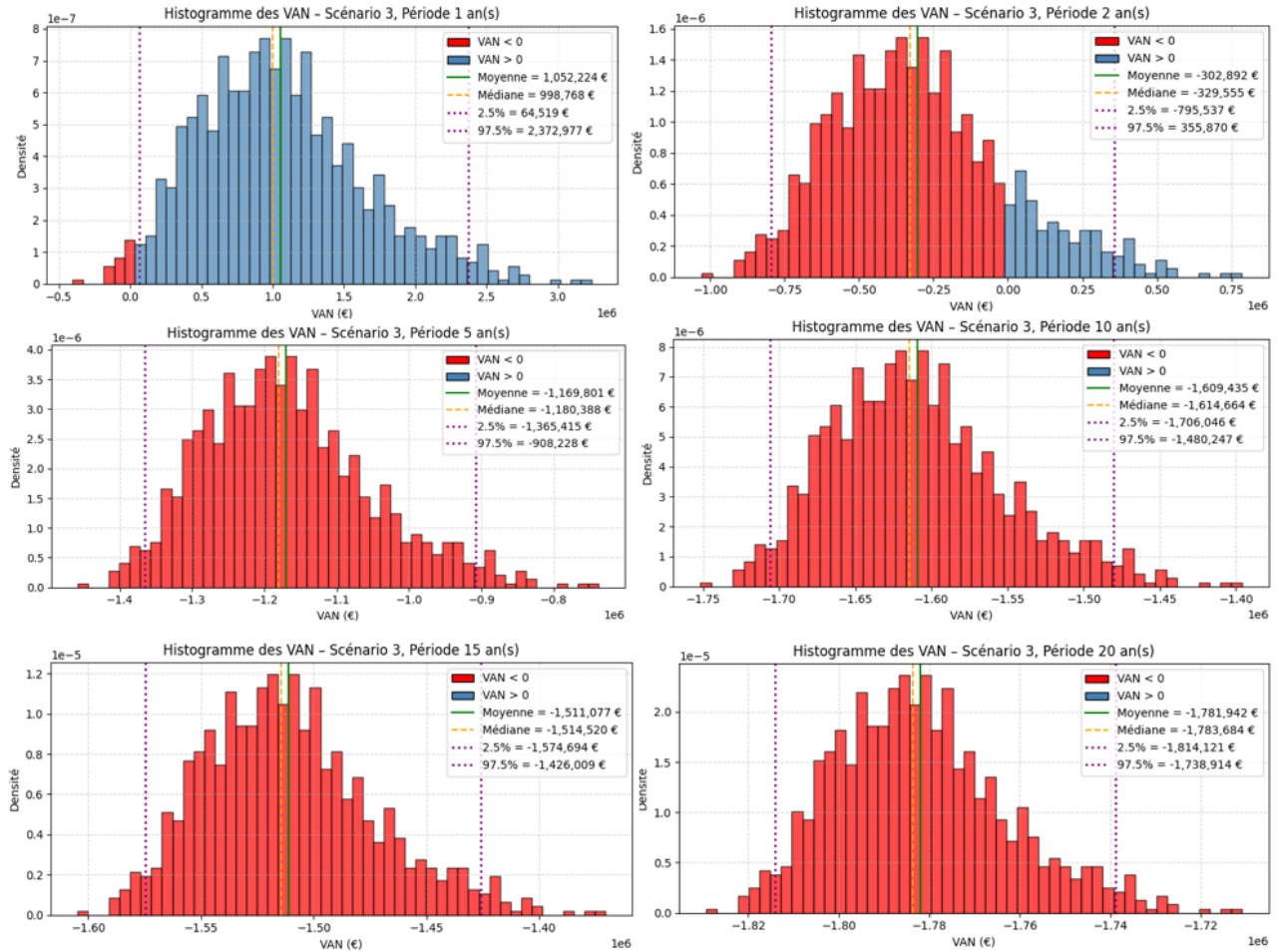


FIGURE 17 – VAN du projet de REUT à Clairia en densité de probabilités, scénario 3

Nous avons choisi de commenter le scénario 3 qui est, pour rappel, le scénario hypothétique qui met à disposition la totalité de l'eau traitée par la STEP de Clairac sur une année grâce à un tuyau reliant la STEP à l'amont de la commune. Les précédents résultats concluaient à une rentabilité dans le seul cas de période de retour égale à 1 an. Ce résultat est confirmé par l'analyse de sensibilité, comme le montre la figure 17 seul ce cas présente une forte probabilité que la VAN soit positive compte tenu des hypothèses faites sur les paramètres initiaux. Remarquons que si on prend en compte une période de retour de 2 ans il y a un nombre significatif de cas pour lesquels la VAN est positive, mais la majorité des états du monde possibles présentent une VAN négative. La prise en compte de l'incertitude permet ici de constater l'étendue des valeurs que peut prendre la VAN en fonction des paramètres initiaux. Sans prise en compte de l'incertitude, la VAN s'élevait à 1.05 M€ dans le cas « scénario 3 ; période de retour 1 an », l'analyse d'incertitude permet de relativiser ce chiffre en nous donnant l'information suivante : la VAN sera comprise entre 65 000 € et 2 372 000 € dans 95% des scénarios étudiés. La prise en compte de l'incertitude met en évidence que les résultats de notre ACB sont sensiblement dispersés, cependant cette dispersion ne change pas significativement les conclusions sur rentabilité du projet de REUT qui reste relativement peu intéressant d'un point de vue économique.

4.1.3 Résultats sur la Vallée de l'Agly

En ce qui concerne l'étude sur le projet de contournement du karst, nous avons choisi de présenter les seuls bénéfices potentiels actualisés car les coûts avancés par l'étude de faisabilité ne sont pas définitifs. Les graphes de la figure 18 nous donnent les dommages évités actualisés sur 30 ans, ce qui constitue les bénéfices potentiels du projet porté par la chambre d'agriculture. Ces bénéfices seront à comparer avec les coûts totaux actualisés du projet quand ceux-ci seront connus. L'interprétation est la même pour tous les graphes. Par exemple, pour une période de retour de 5 ans, les dommages évités calculés seront compris entre 9 M€ et 21 M€ dans 95% des scénarios étudiés, la moyenne s'élevant à 14 M€. La somme des coûts d'investissement et d'exploitation ne devront donc pas dépasser ces montants pour que le projet soit intéressant d'un point de vue économique. Ici les conclusions diffèrent de ce que nous avons conclu précédemment vis à vis du projet *Maillage*. En effet, nous soutenions que seuls les scénarios avec une période de retour inférieure ou égale à 5 ans rendait le projet économiquement cohérent dans les conditions actuelles de chiffrage des coûts. Or, les scénarios à période de retour 10 et 15 ans peuvent à nouveau rentrer en considération car il existe une probabilité significative que, sous ces conditions, les dommages évités totaux dépassent le seuil des 6 millions d'euros, qui est pour rappel le plus bas coût d'investissement considéré jusqu'à présent dans les scénarios de l'étude de faisabilité. Pointons ici le fait que les résultats de VAN plus ou moins élevés sont issus de scénarios avec des états du monde bien distincts : la partie droite de la densité de probabilité de la VAN correspond à un éventail de données d'entrée qui poussent les dommages à la hausse, comme de grandes surfaces touchées par des pertes de fonds, des rendements élevés et des ratios de transformation de produit brut en valeur ajoutée élevés. La même interprétation peut être faite avec la partie gauche de la densité de probabilité de la VAN, celle-ci correspondant à des états du monde où il y a peu de perte de fonds, des rendements plus faibles que la moyenne des dix dernières années et des ratios de valeur ajoutée faible.

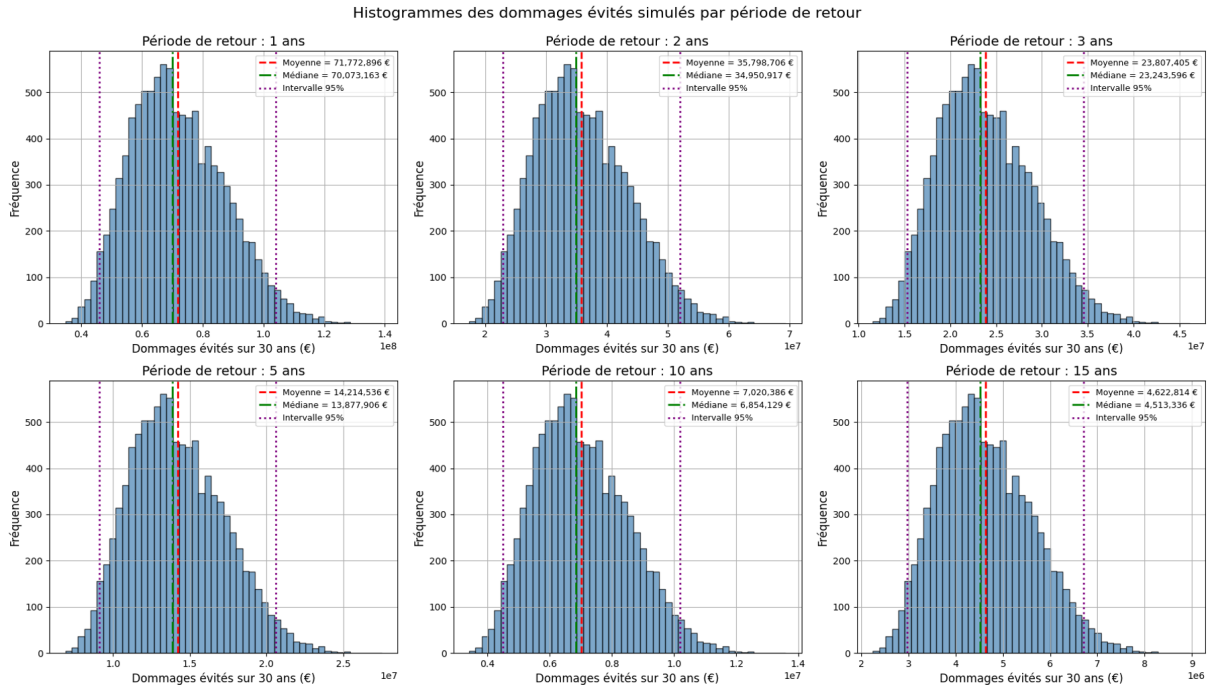


FIGURE 18 – Dommages évités d'un projet théorique de mise à disposition d'eau supplémentaire en période de sécheresse sur la vallée de l'Agly

4.2 Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité permet de dégager les inputs qui expliquent la plus grande part de l'incertitude autour de l'output final. De ce fait elle permet de dégager les données d'entrée pour lesquelles une meilleure précision augmenterait sensiblement la précision des résultats et a contrario, celle qui ont un effet négligeable. La méthode que nous utilisons, appelée méthode de Sobol, permet de générer des « indices de sensibilité ». Il en existe pour chacun de nos inputs et ils permettent de hiérarchiser l'influence de chacun d'entre eux sur l'incertitude de l'output. Nous continuons à suivre l'article de Grelot et al. [2013] ainsi que le livre de Saltelli [2008].

Cette méthode repose sur une analyse statistique des distributions de probabilité qui caractérisent l'output final, dans notre cas la VAN. Le principe est le suivant : deux échantillons de données d'entrée sont tirés aléatoirement dans les distributions de probabilité qui définissent les inputs incertains influençant le modèle. Nous avons donc deux jeux de données, stockés dans des matrices que nous appellerons A et B. Pour chaque variable à laquelle nous voulons associer un indice de sensibilité nous créons un nouveau jeu de données, appelé AB^i , qui se construit à partir des deux matrices A et B. La matrice AB^i est similaire à la matrice A sauf pour la colonne i qui sera remplacée par la colonne i de la matrice B, correspondant à la colonne des tirages aléatoires du paramètre dont nous voulons étudier l'influence sur l'incertitude totale. Le schéma 19 explique cette procédure. Nous calculons ensuite les variances associées aux outputs calculés via le jeu de données A et la variance conditionnelle de l'output obtenu avec le jeu de donnée AB^i . Intuitivement, cela signifie que nous comparons les résultats obtenus en ne faisant varier qu'un seul paramètre parmi l'échantillon de départ pour observer comment la dispersion

de l'output se comporte toutes choses étant égales par ailleurs. Pour calculer les indices de Sobol nous suivons les équations données par Grelot et al. [2013].

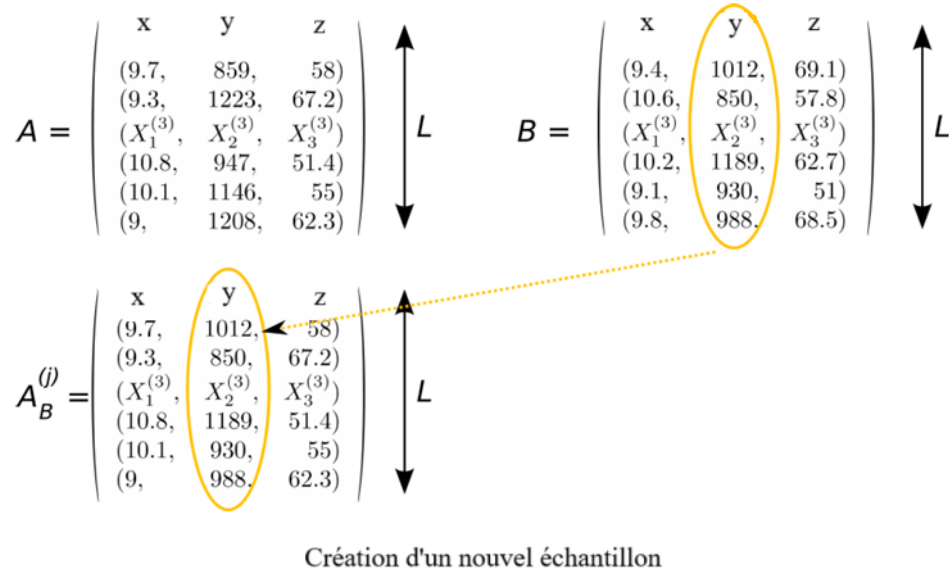


FIGURE 19 – Méthodologie d'échantillonnage pour l'analyse de sensibilité (tiré de Grelot et al (2020))

$$S_i = \frac{\frac{1}{L} \sum_{j=1}^L Y_B^{(i)} \cdot Y_{A_B^{(i)}}^{(j)} - \frac{1}{L} \sum_{j=1}^L Y_B^{(j)} \cdot Y_A^{(j)}}{\frac{1}{L} \sum_{j=1}^L Y_A^{(j)} \cdot Y_A^{(j)} - \left(\frac{1}{L} \sum_{j=1}^L Y_A^{(j)} \right) \cdot \left(\frac{1}{L} \sum_{j=1}^L Y_B^{(j)} \right)} \quad (4)$$

$$ST_i = \frac{\frac{1}{2L} \sum_{j=1}^L \left[Y_A^{(j)} - Y_B^{(i)} \right]^2}{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^L Y_A^{(j)} \cdot Y_A^{(j)} - \left(\frac{1}{L} \sum_{j=1}^L Y_A^{(j)} \right) \cdot \left(\frac{1}{L} \sum_{j=1}^L Y_B^{(j)} \right)} \quad (5)$$

avec Y_A , Y_B et $Y_{A_B^{(i)}}$ les trois vecteurs de sorties Y pour les échantillons A , B et $A_B^{(i)}$; L la taille des échantillons; i le numéro de colonne et j le numéro de ligne.

Les indices de Sobol présentent plusieurs propriétés :

- La somme des indices de premier ordre (S_i) est inférieure ou égale à 1, la différence $\sum S_i - 1$ représente le poids dans interaction entre les variables étudiées dans la variabilité de l'output du modèle
- Les indices totaux sont supérieurs ou égaux aux indices de premiers ordres. La différence $ST_i - S_i$ indique la part de variance de l'output qui est expliquée par l'interaction de l'entrée incertaine X_i avec d'autres entrées X_j

Les indices de premiers ordres permettent d'identifier les variables qui ont le plus d'impact sur la variabilité de l'output final. Plus l'indice est proche de 1, plus il est influent. Les indices totaux permettent d'identifier les variables les moins influentes, qu'elles soient considérées seules

ou en interaction avec d'autres variables.

Notons ici que Saltelli [2008] suggèrent de ne travailler qu'avec des variables indépendantes lors d'une analyse de sensibilité, ceci pour éviter la construction d'échantillons à variables dépendantes qui sont plus laborieux à obtenir et beaucoup plus grand, ce qui allonge le temps de calcul. Nous avons sélectionné nos variables pour respecter ce conseil au mieux, cependant des corrélations existent très probablement, notamment entre les rendements et le ratio $\frac{VA}{PB}$.

4.2.1 Résultats sur Clairia

Les résultats de l'analyse de sensibilité sur l'ACB analysant la REUT à Clairia sont représentés dans la figure 20. Nous constatons que les variables qui génèrent le plus d'incertitude sur les VAN sont d'abord les coûts d'investissements puis, dans une moindre mesure, nos ratios transformant le produit brut en valeur ajoutée et les besoins en eau d'irrigation. Ces trois variables sont donc celles sur lesquelles une diminution de l'incertitude entraînerait la plus grande amélioration de la précision de la VAN. Ces résultats sont relativement cohérents, l'incertitude sur les coûts d'investissement engendre la plus grande étendue autour de sa moyenne si on raisonne en valeur absolue et le ratio transformant la VA en PB intervient dans une étape fondamentale qui impacte des montants là encore très élevés en valeur absolue, il est donc logique de les retrouver en paramètres les plus sensibles. Cependant, en ce qui concerne la variable BEEi, il est plus difficile d'expliquer intuitivement pourquoi son impact sur l'incertitude finale est aussi élevée, ou au moins d'expliquer pourquoi il est plus élevé que pour la variable rendement. Après vérification, il s'avère que cette incertitude provient d'une étape intermédiaire spécifique au cas de Clairia dans le calcul des dommages évités : Le déficit en BEEi calculé en année sèche sur l'ensemble de la commune est supérieur à l'eau que pourrait mettre à disposition la REUT. Pour calculer les bénéfices de la REUT, nous calculons le ratio $B = \frac{EUT}{BEEi_{nonPourvus}}$, avec EUT l'eau mise à disposition par la STEP en année sèche et $BEEi_{nonPourvus}$ les besoins en eau totaux manquants en année sèche. Nous appliquons ensuite ce ratio aux dommages évités calculés sur l'ensemble de la commune si tous les besoins étaient satisfaits et nous obtenons les dommages évités finaux associée à la solution de REUT. Or, au sein même de ce ratio les besoins en eau non pourvus sont soumis à une incertitude. En fixant les besoins en eau à leur valeur moyenne et en recalculant les indices de Sobol nous obtenons les résultats de la figure 21, sur laquelle nous voyons que l'impact des BEEi sur l'incertitude à totalement chuté.

4.2.2 Résultats sur la vallée de l'Agly

Dans la vallée de l'Agly, nous présentons là encore nos résultats pour les dommages évités seulement, puisque trop d'incertitude existe autour des coûts d'investissement et de fonctionnement associés au projet *Maillage*. La figure 22 présente les indices de Sobol du premier ordre pour chaque variable que nous avons probabilisé. La variable la plus impactante sur l'incertitude de la VAN est de loin le paramètre « perte de fonds » qui, pour rappel, varie avec la surface de vergers morts à cause de la sécheresse. Les variations associées à ce paramètre sont là encore très élevées en valeur absolue par rapport aux autres variables, cela explique qu'elle soit le principale moteur de l'incertitude autour des dommages évités. Autrement, on retrouve les deux mêmes facteurs d'incertitude secondaires que sur Clairia, à savoir les rendements et les ratio de valeur ajoutée.

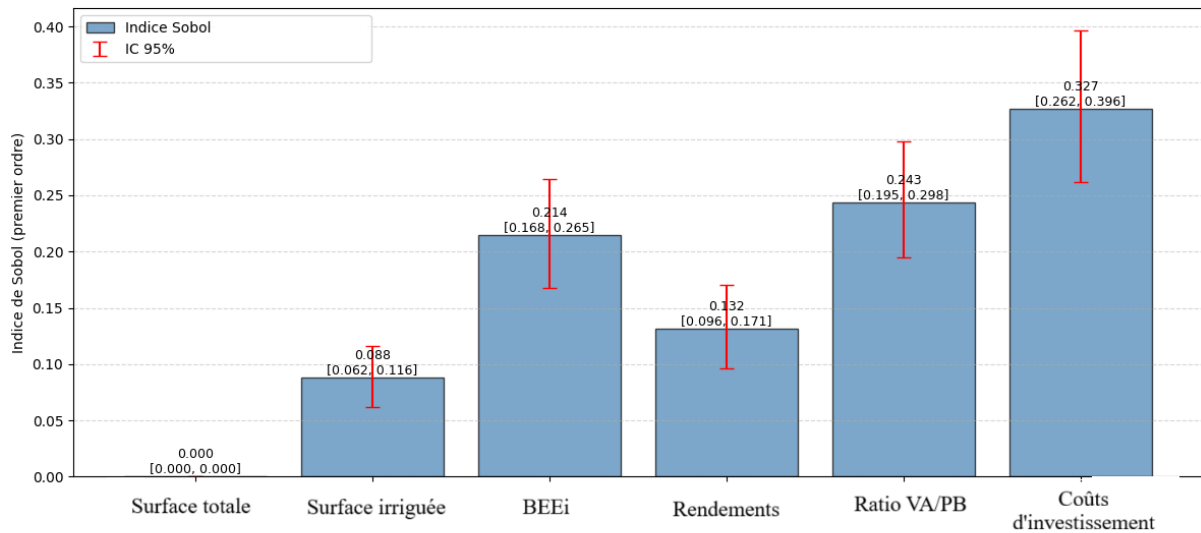


FIGURE 20 – Indices de Sobol : Etude REUT sur Clairra

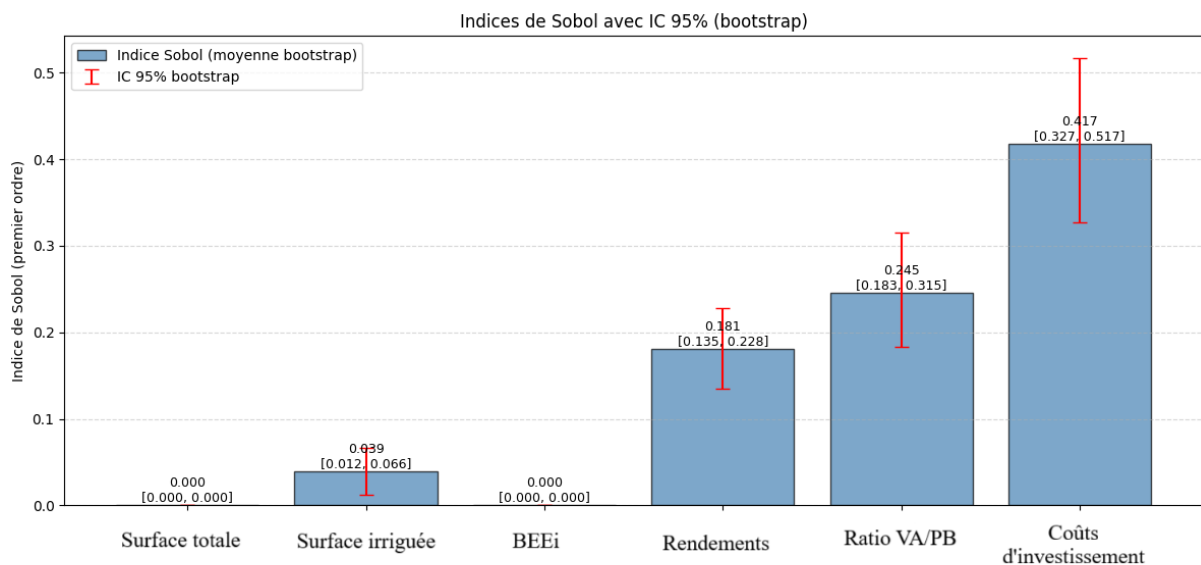


FIGURE 21 – Indices de Sobol : Etude REUT sur Clairra (ratio B fixé)

Pour interpréter les résultats nous renvoyons le lecteur à la figure 18 qui donne les densités de probabilité caractérisant l'incertitude autour des valeurs moyennes de la VAN. Nous pouvons maintenant conclure que c'est la variable *Perte de fonds* qui augmente le plus la variance des résultats. Nous pouvons donc affirmer que la partie droite de la densité de probabilité des dommages évités correspond à une valeur élevée des surfaces touchées par les pertes de fonds, quand la partie gauche correspond à des valeurs faibles. Autrement dit, les dommages évités potentiels sont très dépendants de la surfaces touchées par les pertes de fonds, nous pouvons conclure en deux points :

- L'incertitude autour de cette variable doit être fixée pour que les décideurs puissent

prendre une décision de manière éclairée

- Si l'incertitude ne peut pas être diminuée, il faut avoir en tête que, pour une période de retour sécheresse de 5 ans, les scénarios de dommages évités avoisinants les 22 millions d'euros correspondent à des surfaces en perte de fonds de d'environ 50 hectares sur la vallée de l'Agly. Symétriquement, des dommages évités avoisinants les 11 millions d'euros correspondent à des surfaces en perte de fonds d'environ 10 hectares sur le même territoire.

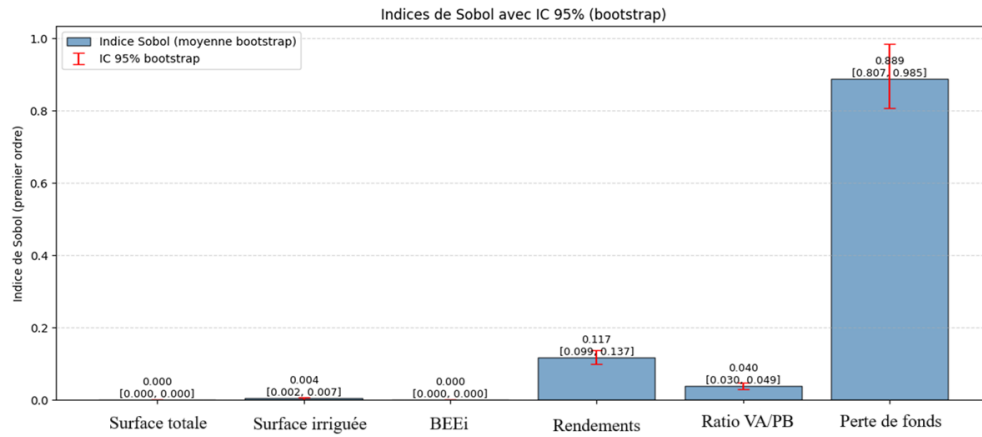


FIGURE 22 – Indice de Sobol sur les dommages évités potentiels de la vallée de l'Agly

5 Discussion

Nous avons proposé dans ce travail une méthodologie de comptabilisation des dommages induits par la sécheresse puis une méthodologie d'évaluation de projet ayant pour but de sécuriser des volumes d'eau en cas de crise pour le monde agricole. Notre méthodologie s'appuie sur des données relativement simples et disponibles (SIG, SAA, Memento BRL, RICA, etc.) hormis pour les courbes de réponses à l'eau que nous avons reconstruites à partir de celles extraites du travail du projet TALANO-WATER. En somme, l'évaluation de projet de sécurisation de l'eau par notre modèle est possible tant que des données sur des rendements, des besoins en eau et des surfaces agricoles sont disponibles, on peut alors imaginer plusieurs extensions, notamment en changeant l'assolement pris initialement en compte. Cela permet d'évaluer une solution basée sur la réduction de la demande en eau avec la même méthode qui nous a permis jusque là d'évaluer deux solutions jouant sur l'augmentation de l'offre.

5.1 Extension possible : Changement d'assolement

Pour répondre aux nouvelles conditions climatiques de la région et faire face au stress hydrique croissant, d'autres solutions d'adaptation sont envisagées. C'est le cas du changement d'assolement, une solution qui consiste à proposer une gestion de la demande et non plus de l'offre en eau. Rappelons que Amigues et al. [2006] et Reynaud [2009] ont conclu à l'importance de cette solution pour l'adaptation de l'agriculture sur le long terme. L'Association Avenir de Productions Agricoles Résilientes Méditerranéennes (APARM) suit cette voie en proposant aux agriculteurs.rice.s des scénarios d'adaptation qui pourraient rendre leur mix cultural plus résilient. Un des projets phares de l'APARM consiste en l'implantation d'une filière de pistache dans les Pyrénées-Orientales, une culture pérenne qui peut être rentable sans irrigation (à l'exception des trois premières années). Leur objectif est de planter 500 hectares de pistachiers à horizon 2030, ce qui constitue un projet d'adaptation à part entière qui entre dans notre cadre d'analyse. En effet, en remplaçant des cultures irriguées par des cultures pluviales les agriculteurs se protègent du risque sécheresse et s'assurent un revenu tout en diminuant leur consommation en eau.

Nous avons repris ce projet de changement d'assolement en l'adaptant à notre cadre d'analyse. Nous nous basons directement sur les travaux de l'APARM qui a chiffré les coûts (investissements inclus) et les bénéfices de l'installation d'un verger de pistachier sur un hectare sur les 20 premières années. Les pistachiers commencent à produire à leur septième année et la récolte augmente progressivement chaque année jusqu'à atteindre un maximum vers la vingtième année. D'après les travaux de l'APARM, à son pic de production, un hectare de pistachier génère 7800 € de valeur ajoutée, charges totales et amortissements compris. Dans le souci de pouvoir le comparer au projet *Maillage*, et pour pouvoir le modéliser plus facilement, nous avons adopté une version simplifiée du projet Pistache, celui-ci est considéré comme suit : 500 hectares de vignes irriguées sont remplacés par des pistachiers, ceux-ci ne sont pas productifs les 15 premières années puis atteignent leurs pics de production les 15 suivantes. Nous faisons l'hypothèse que les débouchés existent et que les pistachiers ne subissent aucune perte de rendement en année sèche. Pour étudier les apports d'un tel projet nous procédons par comparaison à un scénario contrefactuel. Nous calculons, pour deux assolements différents, la somme des valeurs ajoutées sur trente ans

avec plusieurs scénarios de période de retour de sécheresse. Dans un souci d'intelligibilité, nous appellerons l'assolement « initial » ou « contrefactuel » celui qui a les 500 hectares de vignes irriguées et l'assolement « pistache » celui du projet étudié.

Nous comparons les valeurs ajoutées totales actualisées de l'ensemble du secteur agricole sur trente ans pour l'assolement initial et pour l'assolement pistache. Cette valeur ajoutée totale actualisée est supérieure de 31 millions d'euros pour l'assolement pistache par rapport à l'assolement initial dans le cas où aucune sécheresse n'advient sur les trente années étudiées. Cet écart augmente à mesure que le nombre de sécheresse augmente, comme on peut le voir dans le tableau 12.

période de retour (années)	Ecart de $VA_{pistache} - VA_{initial}$ sur 30 ans (M€)
1	34.9
2	33.2
3	32.5
5	32
10	31.7
15	31.5
20	31.4

TABLE 12 – Ecart entre la valeur ajoutée totale du scénario pistache et celle scénario initial, sur 30 ans, en millions d'euros

Les résultats obtenus sont relativement intuitifs. L'introduction des pistachiers améliore globalement la valeur ajoutée du territoire, ce qui est logique puisque la valeur ajoutée associée à un hectare de pistachier (7800 €/ha/an) est nettement supérieure à celle de la vigne (1067 €/ha/an). L'écart entre la valeur ajoutée globale du scénario pistache et celle du scénario initial augmente à mesure que la probabilité d'occurrence des sécheresse augmente, ce qui est encore une fois logique puisque la valeur ajoutée du scénario pistache connaît moins de perte du fait de la résilience des pistachiers qui ne subissent, par hypothèse, aucune perte, ce qui n'est pas le cas des vignes. Cette rapide comparaison entre ces deux scénarios reste à creuser mais elle illustre la possibilité de comparer différents assolements d'un point de vue économique et même de comparer des adaptations à la sécheresse de nature différentes, les bénéfices calculés associés à un changement d'assolement pouvant être comparés aux bénéfices calculés induits par la mise en place d'une infrastructure de sécurisation de l'eau.

Ceci étant, une analyse associant gestion de l'offre et de la demande serait aussi intéressante pour établir une stratégie d'adaptation globale et cohérente à l'échelle du bassin versant.

5.2 Apports et limites

L'échelle à laquelle nous travaillons coïncide avec l'échelle de prise de décision inhérent à la gestion de l'eau. Cela permet à nos résultats d'être considérés comme des données cohérentes pouvant être utilisées par des décideurs locaux dans le cadre de prises de décisions informées. Le niveau de précision géographique permet aussi de ne pas passer à côté de problèmes importants comme l'inadéquation des lieux de besoin et de production d'eau. D'un point de vue technique, les données d'entrée que nous avons utilisées sont les données disponibles les plus fines. La critique de ces données peut être atténuée par notre analyse d'incertitude qui permet de produire des

conclusions précises et fiables à partir de données d'entrée incertaines.

Ceci étant, notre travail présente des limites certaines. Notre évaluation ne permet qu'une représentation partielle du bien être social. En effet, nous ne prenons en compte que les bénéfices affiliés aux rendements des exploitations agricoles et ce pour les années sèches seulement. Or, nous pouvons penser que d'autres bénéfices induits par mise en place d'infrastructure de sécurisation de l'offre en eau peuvent exister. Par exemple, lors d'une année non sèche, la substitution de l'eau d'irrigation issue de prélèvements dans les nappes phréatiques par de l'eau de REUT peut réduire le risque d'incursion du biseau salé dans les nappes proches du littoral. De la même manière, les seuls coûts d'investissement et de fonctionnement des projets sont pris en compte, ce qui est une hypothèse forte dans le cadre d'une ACB sur des infrastructures qui impacte l'environnement. En effet, la construction de ces projets peut aussi générer des coûts indirects économiques ou environnementaux (liés par exemple à la destabilisation des milieux après la modification du chemin « naturel » de l'eau).

6 Conclusion

Les épisodes de sécheresse sont voués à se multiplier et à s'intensifier du fait du changement climatique. Dans les Pyrénées-Orientales, département le plus sec de France et durement touché par une longue sécheresse à partir de 2022, des projets d'adaptation au stress hydrique voient le jour à des échelles diverses. À Clairà, on réfléchit à investir dans la station d'épuration de la commune pour pouvoir accroître l'offre en eau via la REUT et alimenter les agriculteur.rice.s voisin.e.s lors des situations de crise. À l'échelle du bassin versant un projet d'optimisation des réseaux d'irrigation est envisagé pour diminuer les prélèvements nécessaires à la consommation en eau d'irrigation des cultures et améliorer le pilotage des lâchés de barrages. Dans la mesure où les risques de mésadaptation et d'exclusivité sont inhérents aux problématiques de l'adaptation au changement climatique, il est impératif de chercher à atteindre un cadre informationnel robuste pour que les décideurs puissent juger convenablement de la pertinence de ces projets. Ce travail s'inscrit dans ce cadre en proposant une comptabilisation économique des coûts induits par la sécheresse et une évaluation des projets qui visent à les réduire. Nous avons proposé une méthodologie des coûts induits en nous appuyant sur quatre piliers : le recensement géographique des parcelles agricoles, un modèle hydrique calculant les besoins en eau d'irrigation, des courbes de réponses à l'eau qui lient ces besoins aux rendements et la statistique agricole qui renseigne les rendements. En nous basant sur ce jeu de données nous avons construit un modèle permettant de calculer les pertes de rendements provoquées par le stress hydrique pour une année ayant les caractéristiques de 2023 (niveau des nappes et restrictions administratives). Les dommages pour une année sèche étant construits, nous les utilisons dans une ACB qui évalue la pertinence de la mise en place des projets dont nous avons parlé. La méthode des coûts évités permet de comptabiliser comme bénéfiques l'évitement des pertes de rendements permis par la présence des infrastructures de sécurisation de l'eau, nous procédons donc à une ACB pour évaluer la pertinence économique des projets considérés.

Sur la commune de Clairà, les dommages induits par la sécheresse représentent 34% de la valeur ajoutée créée par les agriculteurs. L'apport de volumes d'eau sécurisés en période de sécheresse pourrait éviter la majeure partie de ces pertes économiques, cependant l'analyse révèle qu'en prenant en compte l'ensemble des coûts du projet REUT il faudrait qu'une sécheresse du type de celle de 2023 advienne plus qu'une année sur deux pour que les dommages évités compensent les investissements, ce qui est peu probable même dans le contexte du changement climatique. De plus, une analyse spatiale révèle que les coûts d'investissement disponibles pour ce projet sont sous-évalués du fait de la position géographique de la STEP qui se trouve en aval de la commune alors que les parcelles dans le besoin se trouvent en amont. Le projet REUT de Clairà n'est pas économiquement pertinent dans la majeure partie des scénarios que l'on considère.

Dans le cas du projet *Maillage*, la sécheresse impacte les rendements à la baisse mais induit aussi des pertes de fonds. Le total des dommages calculés en année sèche s'élève à 2.4 millions d'euros. N'ayant pas d'informations sur les coûts définitifs du projet *Maillage* nous avons fait le choix de présenter les seuls bénéfices potentiels que pourrait rapporter le projet sur l'ensemble de sa durée de vie en fonction de la période de retour de ce type de sécheresse (qui pour rappel n'a pas encore été arrêtée). Ainsi, pour une période de retour égale à 5 ans, les bénéfices totaux du projet *Maillage* s'élèveraient à 14 millions d'euros, ce qui fixe la limite pour l'ensemble des

coûts du projet.

Dans la quatrième partie nous avons étudié l’incertitude qui existe autour de notre modèle. Celui-ci repose sur des données qui sont parfois volatiles et il faut étudier comment une variation sur les données d’entrée peut affecter les résultats. Ainsi, nous avons analysé l’incertitude de notre modèle grâce à la méthode Monte-Carlo et trouvons qu’il existe effectivement une large variation autour de nos résultats. Dans le cas de la REUT à Clairia, les variances autour des valeurs moyennes sont grandes mais elles n’influencent pas les recommandations faites avant l’analyse d’incertitude, la REUT ne reste économiquement pertinente que dans une faible part des scénarios possibles. A contrario, dans le cas de la vallée de l’Agly où nos résultats font office de seuil à ne pas dépasser pour les coûts d’investissements et de fonctionnements, l’incertitude implique d’être plus précis dans la lecture des résultats : l’amplitude des distributions de probabilités caractérisant les dommages évités étant relativement grande, il faut s’aider de l’analyse de sensibilité pour comprendre les scénarios possibles. Ainsi, certaines données d’entrée expliquent une grande part de l’incertitude autour de nos résultats finaux (la surfaces en perte de fonds, les coûts d’investissement) et il faut avoir en tête que chaque résultat dans notre distribution de probabilités correspond à un éventail de données caractérisant un état du monde de départ qui peut être très différent d’un résultat à l’autre, aux décideurs d’arbitrer entre ces états du monde et de prendre leurs décisions en fonction.

Les solutions d’adaptation étudiées dans ce travail sont globalement centrées sur une augmentation de l’offre en eau pour maintenir une agriculture déjà en place. Nous avons montré que ces solutions sont, du point de vue économique, rentables que si l’on suppose une fréquence importante de sécheresses du type de celle connue en 2023. De ce fait, nous questionnons la pertinence des solutions basées sur une logique de l’offre et nous demandons si une adaptation de la demande en eau, via des changements d’assolement, ne serait pas une solution plus intéressante d’un point de vue économique. Le cas d’un changement d’assolement vers des cultures perennes (les pistachiers) que nous avons étudié de manière très succincte suggère que la gestion par la demande est effectivement plus pertinente d’un point de vue économique. Cependant une analyse plus approfondie est nécessaire.

Références

- J.-P. Amigues, P. P. Debaeke, B. B. Itier, G. G. Lemaire, B. Seguin, F. F. Tardieu, A. Thomas, . Expertise Scientifique Collective Uesc, and . Ministère de L'Agriculture Et de La Pêche. Sécheresse et agriculture. Réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau. Expertise scientifique collective. Synthèse du rapport. Other, INRA, 2006. URL <https://hal.inrae.fr/hal-02824089>.
- S. Arborea, G. Giannoccaro, B. C. De Gennaro, V. Iacobellis, and A. F. Piccinni. Cost–benefit analysis of wastewater reuse in puglia, southern italy. *Water*, 9(3), 2017. ISSN 2073-4441. doi : 10.3390/w9030175. URL <https://www.mdpi.com/2073-4441/9/3/175>.
- E. Boillot, A. Lefèvre, M. Launay, and R. Le Roux. Identification et caractérisation des risques d'impact du changement climatique en production légumière : méthodologie appliquée et cas d'étude de systèmes maraîchers méditerranéens plein champ et sous abri. Technical report, GIS PIClég, Mar. 2025. URL <https://hal.inrae.fr/hal-04984190>.
- BRGM. Évaluation des ressources en eau des corbières. phase i - synthèse de la caractérisation des systèmes karstiques des corbières orientales. volume 2 - caractérisation géologique et hydrogéologique du système karstique du « synclinal du bas-agly ». Rapport final BRGM/RP-52919-FR, BRGM, Feb. 2004. Étude réalisée dans le cadre des opérations de Service public du BRGM 2004-EAU-01.
- BRGM, INRAE, and OiEau. Explore2 : Projections hydrologiques pour les eaux de surface et souterraines (au moins 70 simulations hydro-climatiques). Technical report, Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) ; Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement (INRAE) ; Office international de l'eau (Gest'eau), 2024. URL <https://www.brgm.fr/>. Projets décrits dans le rapport annuel 2021 du BRGM et sur les sites BRGM et Gest'eau.
- M. Coll. Réutiliser l'eau de la station d'épuration de la commune de claira (pyrénées-orientales) pour l'agriculture : enjeux de gestion de la ressource hydrique en contexte de changement climatique. Mémoire de fin d'études, master 2 gestion des territoires et développement local, parcours espaces ruraux et développement local, Université Paul-Valéry Montpellier 3, 2024. Tuteur universitaire : Stéphane Ghiotti. Tuteurs de stage : Guillaume Lacquement et Wolfgang Ludwig. Structure d'accueil : Défi Clé Water Occitanie – Living Lab Clair.
- P. Debaeke and M. Bertrand. Évaluation des impacts de la sécheresse sur le rendement des grandes cultures en france. *Cahiers Agricultures*, 17(5) :437–443, 2008. doi : 10.1684/agr.2008.0230. URL <https://doi.org/10.1684/agr.2008.0230>.
- J. Doorenbos. *Réponse des rendements à l'eau*. FAO, Rome, 1980.
- K. Erdlenbruch, E. Gilbert, F. Grelot, and C. Lescoulier. Une analyse coût-bénéfice spatialisée de la protection contre des inondations. application de la méthode des dommages évités à la basse vallée de l'orb. *Ingénieries eau-agriculture-territoires*, 53 :3–20, 2008.

- K. Erdlenbruch, S. Loubier, M. Montginoul, S. Morardet, and M. Lefebvre. La gestion du manque d'eau structurel et des sécheresses en France. *Sciences, Eau et Territoires*, 11(2) :78–85, 2013. doi : 10.3917/set.011.0078.
- European Commission. Water scarcity and droughts. in-depth assessment. second interim report. Report, European Commission, 2007.
- D. Fleming-Muñoz, G. Bonnett, and S. Whitten. The economics of drought : A review of impacts and costs. *Australian Journal of Agricultural Resource Economics*, 67(4) :501–523, 2023. doi : 10.1111/1467-8489.12527.
- R. Gournet. Projet CompAqui : Volet sociologique – Compte rendu d'enquêtes. Positionnement des parties prenantes autour du projet de REUT de la Commune de Clairac dans les Pyrénées Orientales. Rapport sociologique, Projet CompAqui, Clairac, Pyrénées-Orientales, France, Sept. 2024.
- N. Graveline and P. Merel. Intensive and extensive margin adjustments to water scarcity in France's Cereal Belt. *European Review of Agricultural Economics*, 41(5) :707–743, 2014. doi : 10.1093/erae/jbt039. URL <https://brgm.hal.science/hal-01169923>.
- F. Grelot, J.-S. Bailly, N. Saint Geours, and T. Länger. Incertitudes dans les études ACB-DE : guide méthodologique. Technical report, irstea, 2013. URL <https://hal.inrae.fr/hal-02609404>. [Departement_IRSTEA]Eaux [TR1_IRSTEA]GEUSI [ADD1_IRSTEA]Hydrosystèmes et risques naturels [Type_IRSTEA]Rapport d'étude.
- J. Hardelin and F. Marical. Taux d'actualisation et politiques environnementales : un point sur le débat. Études & documents, Commissariat général au développement durable (CGDD) - Service de l'économie, de l'évaluation et de l'intégration du développement durable (SEEIDD), France, mai 2011.
- C. Henry. La microéconomie comme langage et enjeu de négociations. *Revue économique*, (1) : 177–197, 1984.
- IPCC. *Climate Change 2023 : Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, Geneva, Switzerland, 2023. doi : 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.
- IREEDD. Étude de faisabilité de réutilisation des eaux usées sur la commune de Clairac (66) incluant la recharge artificielle de la nappe. rapport d'analyse de l'atelier n°3 : étude socio-économique. Rapport, IREEDD, France, 2023.
- S. Loubier and R. Declercq. Analyses coûts-bénéfices sur la mise en œuvre de projets de réutilisation des eaux usées traitées (reuse). Technical report, ONEMA, IRSTEA, France, 6 2014. Licence Ouverte / Open Licence 2.0.
- N. Mancosu, D. Spano, M. Orang, and R. L. Snyder. SIMETAW# - a Model for Agricultural Water Demand Planning. *Water Resources Management*, 30(2) :541–557, 2016. doi : 10.1007/s11269-015-1176-7. URL <https://doi.org/10.1007/s11269-015-1176-7>.

- M. Molinos-Senante, F. Hernández-Sancho, and R. Sala-Garrido. Economic feasibility study for wastewater treatment : A cost–benefit analysis. *Science of The Total Environment*, 408(20) : 4396–4402, 2010. ISSN 0048-9697. doi : <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.07.014>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969710007084>.
- OCDE. *Analyse coûts-bénéfices et environnement : Développements récents*. Éditions OCDE, Paris, 2007. doi : 10.1787/9789264010079-fr. URL <https://doi.org/10.1787/9789264010079-fr>.
- OCDE. *Analyse coûts-avantages et environnement : Avancées théoriques et utilisation par les pouvoirs publics*. Éditions OCDE, Paris, 2019. doi : 10.1787/9789264300453-fr. URL <https://doi.org/10.1787/9789264300453-fr>.
- OECD. *Cost-Benefit Analysis and the Environment : Further Developments and Policy Use*. OECD Publishing, Paris, 2018. doi : 10.1787/9789264085169-en. URL <https://doi.org/10.1787/9789264085169-en>.
- A. Reynaud. Adaptation à court et à long terme de l’agriculture au risque de sécheresse : une approche par couplage de modèles biophysiques et économiques. *Revue d’Etudes en Agriculture et Environnement - Review of agricultural and environmental studies*, 90 :121–154, 2009. URL <https://hal.science/hal-01201194>.
- A. Saltelli. *Global sensitivity analysis : the primer*. John Wiley, 2008. ISBN 9780470059975. URL <http://books.google.at/books?id=wAssmt2vumgC>.
- Y. Zhang and D. Shindell. Costs from labor losses due to extreme heat in the usa attributable to climate change. *Climatic Change*, 164, 02 2021. doi : 10.1007/s10584-021-03014-2.

A Annexes

A.1 Localisation de nos terrains d'étude

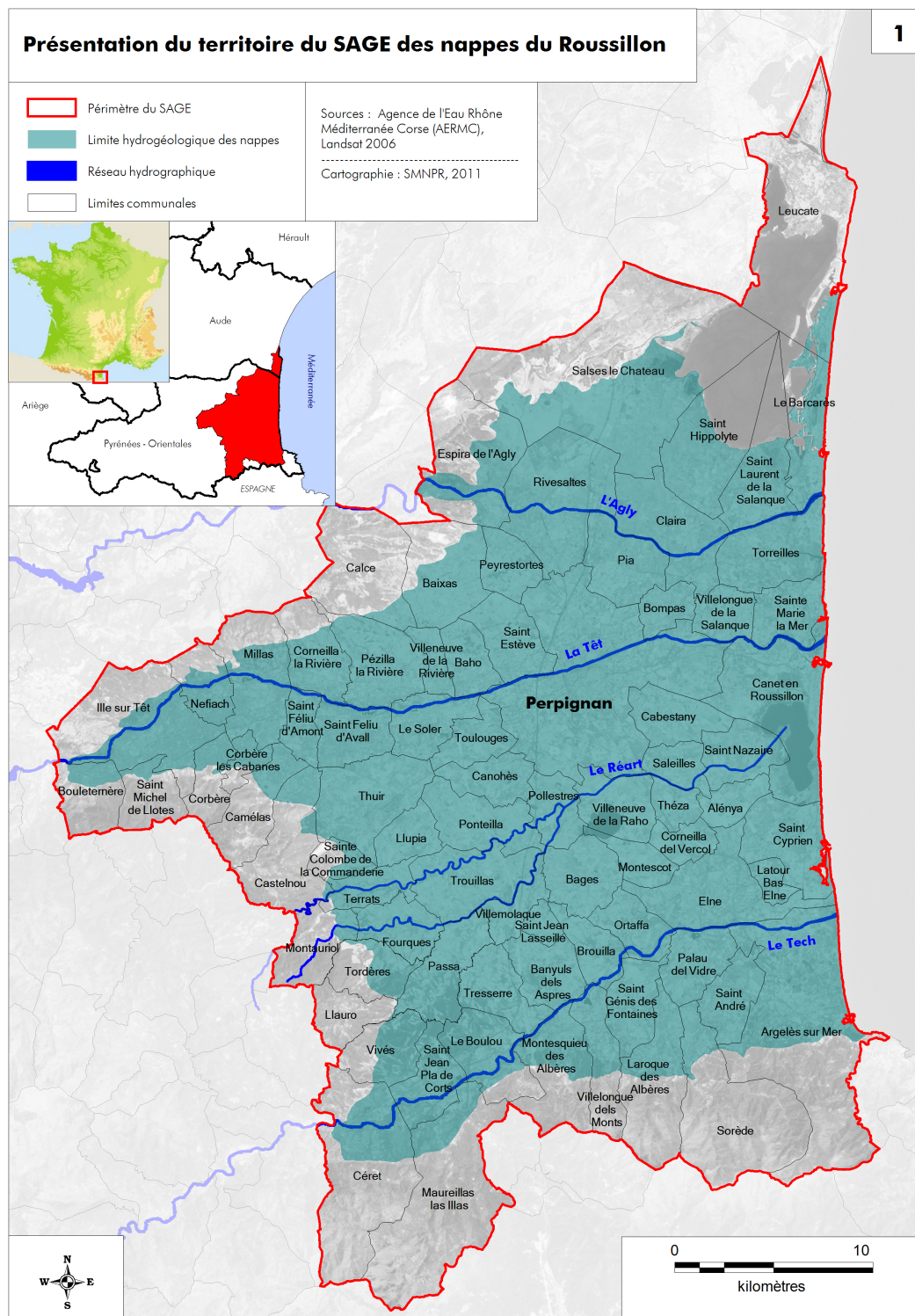


FIGURE 23 – Carte de la Plaine du Roussillon

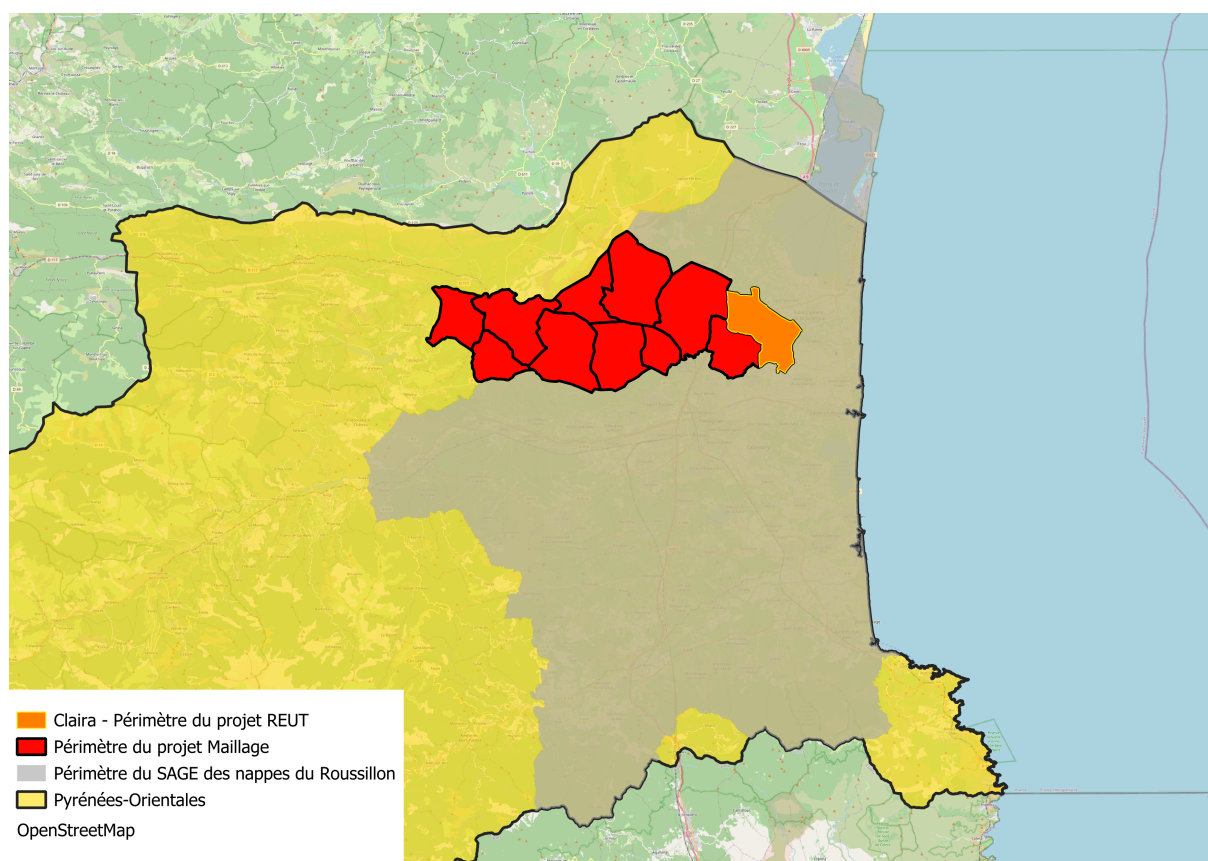


FIGURE 24 – Périmètres des projets étudiés

A.2 Calcul de l'EBE depuis le produit brut

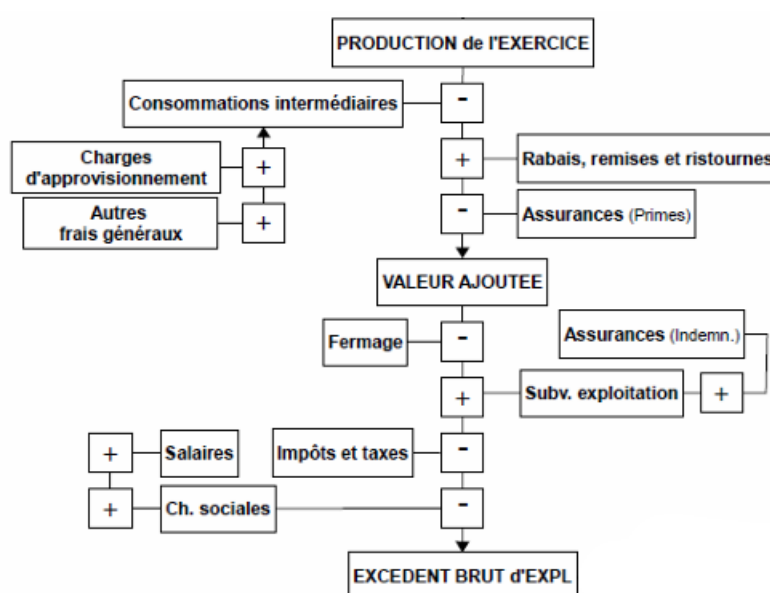


FIGURE 25 – Schéma explicatif du calcul de la Valeur Ajoutée et de l'Excédent Brut d'Exploitation

A.3 Living Lab

« Un Living Lab est un ensemble d'acteurs et de parties prenantes qui sont organisés pour permettre et encourager l'innovation, généralement dans un domaine ou une thématique spécifique, également souvent en lien fort (voire une spécialisation) avec un territoire donné.

À la fois environnement et approche, le Living Lab doit permettre la mise en place par co-construction d'un processus collaboratif de recherche et d'innovations entre acteurs et chercheurs. Il recueille les besoins des usagers et transforme ces besoins en question de recherche. Les usagers sont des acteurs clés dans le processus d'innovation ».¹⁵

Mon stage s'est déroulé dans la cadre d'une demande du Living Lab de Clairac. Ce Living Lab fait partie du projet Water Occitanie qui a pour but d'étudier et de valoriser les solutions de réutilisation des eaux usées dans la région Occitanie. Le Living Lab est composé de plusieurs types d'acteurs : professionnel.le.s de l'eau (Syndicat des Nappes du Roussillon, Syndicat de Bassin Versant de L'Agly), professionnel.le.s du secteur agricole (Chambre d'Agriculture des Pyrénées-Orientales), élus locaux, chercheurs.

Dans le cadre du stage j'ai été accueilli dans les locaux du Syndicat Mixte des Nappes du Roussillon où j'ai passé le tiers de mon temps. J'ai pu assister à plusieurs réunions relative au secteur agricole (Atelier Formation Stratégie Agriculture, Eau et Territoire) ou à la gestion de l'eau (réunion de la Commission Locale sur l'Eau (CLE), « chargée d'élaborer de manière collective, de réviser et de suivre l'application du schéma d'aménagement et de gestion des eaux (SAGE) »¹⁶) sur le terrain d'étude. Durant cette période j'ai pu rencontrer plusieurs d'acteur.rice.s de terrains (dont la liste figure ci-après A.4) qui m'ont éclairé sur la situation et les enjeux relatifs à la sécheresse qu'a connu la région à partir de 2022. Ces rencontres ont aussi été menées dans la cadre de recherche de données sur les besoins en eau des cultures, les prélèvements en eau des ASA et des forages individuels, les déclarations de pertes agricoles, les recensements géographique des parcelles et leur assolement, etc. Un temps considérable du stage a été consacré à la recherche de données et, quand celles-ci n'étaient pas disponibles, à leur construction.

15. <https://woc.edu.umontpellier.fr/des-territoires-innovants-defi-cle-water-occitanie/>

16. <https://www.gesteau.fr/partage-experiences/commission-locale-de-leau>

A.4 Liste des acteur.rice.s de terrain rencontrés

- **Hichem Tachrift** - Syndicat Mixte des Nappes de la Plaine du Roussillon, Directeur
- **Emilie Barthe** - Syndicat Mixte des Nappes de la Plaine du Roussillon, Chargée de Mission PGRE
- **Grégoire Vidal** - Syndicat Mixte des Nappes de la Plaine du Roussillon, Technicien de Nappes
- **Séverine Le Mestre** - Syndicat Mixte des Nappes de la Plaine du Roussillon, Chargée de Mission SAGE
- **Jean Bertrand** - Chambre d'Agriculture, Chef du Service Eau
- **François Toulet-Blanquet** - Syndicat Mixte de Bassin Versant de l'Agly, Directeur
- **Coralie Miguel** - Syndicat Mixte de Bassin Versant de l'Agly, Chargée d'études Ressource en eau
- **Frédéric Nicoleau** - Mairie de Clairac, Conseiller en charge de l'eau et de l'assainissement
- **Magali Trilla-Rougé** - Conseil Départemental, Responsable du service « Barrage Hydraulique »
- **Myriam Levalois-Bazer** - APARM, Coordinatrice
- **Guillaume Lacquement** - Art-Dev, Professeur des Universités (Géographie)
- **Cyprien Jacquot** - Direction Départementale de Territoires et de la Mer, Chef de projet usages agricoles de l'eau
- **Rachel Lakhdari** - Direction Départementale de Territoires et de la Mer, Foncier-Filières-Crise agricole
- **Marion Galaup** - Communauté de communes des Albères, Directrice de la régie des eaux
- **Florent Tarrisse** - Inspection générale de l'Environnement et du Développement durable, Inspecteur général
- **Fady Hamadé** - IREEDD, Directeur
- **Julitte Le Gallo** - UMR Innovation, Doctorante en économie
- **Nina Graveline** - UMR Innovation, Economiste
- **Jean-Louis Fusillier** - ASA du canal de la plaine du Roussillon, Président

A.5 Morceaux clés du modèle Python

A.5.1 Fonction de tirage aléatoire des inputs pour l'analyse d'incertitude

```
1 def tirer_valeur(min_val, mode_val, max_val, n=1):
2     if min_val >= max_val:
3         raise ValueError("min_val doit être strictement inférieur à max_val.")
4     if not (min_val <= mode_val <= max_val):
5         raise ValueError("mode_val doit être compris entre min_val et max_val.")
6
7     scale = max_val - min_val
8     c=(mode_val-min_val) / scale #position relative du mode entre min et max
9     dist = triang(c=c, loc=min_val, scale=scale)
10    return dist.rvs(n)
```

A.5.2 Calcul de la VAN pour Clairia pour différents scénarios d'investissement et plusieurs périodes de retour

```
1  # ===== Paramètres généraux =====
2  inv = 184284
3  fonc = 476176.10
4  surcouts_800m = 200000
5  surcouts_5km = 1137046.71 # 1250000 - 43100 - 12500 - 18077.30 - 39275.99
6
7  taux_actualisation = 0.025
8  inflation = 0.02
9  N = 30
10  periodes_retour = [1, 2, 3, 5, 10, 15, 20]
11
12  # Nombre de simulations (doit correspondre à la taille des listes d'entrée)
13  n_simulations = len(distrib_VA_SAUVABLE_TOTALE_CLAIRA)
14
15  # ===== Stockage des résultats =====
16  resultats = {}
17
18  # ===== Boucle principale =====
19  for periode_retour in periodes_retour:
20      inv = tirer_valeur(184284*0.9, 184284, 184284*1.2)[0]
21      fonc = tirer_valeur(476176.10*0.9, 476176.10, 476176.10*1.2)[0]
22      surcouts_800m = tirer_valeur(200000*0.9, 200000, 200000*1.2)[0]
23      surcouts_5km = tirer_valeur(1137046.71*0.9, 1137046.71, 1137046.71*1.2)[0]
24      for scenario in [1, 2, 3]:
25          van_simulee = []
26          for i in range(n_simulations):
```

```

27     deficit = distrib_DEFICIT_EAU_CLAIRA[i]
28     va_sauvable = distrib_VA_SAUVABLE_TOTALE_CLAIRA[i]
29
30     # Ratios en fonction du scénario
31     if scenario in [1, 2]:
32         ratio = 95200 / deficit
33     else:
34         ratio = 200000 / deficit
35
36     DEMA = va_sauvable * ratio
37
38     # Coûts selon le scénario
39     if scenario == 1:
40         cout_total = inv + fonc
41     elif scenario == 2:
42         cout_total = inv + fonc + surcouts_800m
43     else:
44         cout_total = inv + fonc + surcouts_5km
45
46     # Calcul de la VAN simulée
47     van = -cout_total
48     n = periode_retour
49     while n <= N:
50         van +=
51             (DEMA * (1+inflation)**(n))/((1+taux_actualisation)**(n))
52         n += periode_retour
53     van_simulee.append(van)
54
55     # Sauvegarder la distribution
56     resultats[(scenario, periode_retour)] = van_simulee

```

A.5.3 Calcul des dommages évités pour la vallée de l'Agly

```

1     # Paramètres
2     taux_actualisation = 0.025
3     inflation = 0.02
4     N = 30
5     periodes_retour = [1, 2, 3, 5, 10, 15, 20]
6
7     # Nombre de simulations (tirages)
8     n_simulations = len(distrib_VA_SAUVABLE_TOTALE_BV)
9     # doit correspondre à la taille de la distribution
10

```

```

11  # Dictionnaire pour stocker les distributions de VAN
12  resultats = {
13      "Période de retour (années)": [],
14      "Distribution VAN (Scénario 1)": [],
15  }
16
17  # Boucle sur chaque période de retour
18  for periode_retour in periodes_retour:
19      resultats["Période de retour (années)"].append(periode_retour)
20
21      van_distribution = []
22
23      for i in range(n_simulations):
24          VA = distrib_VA_SAUVABLE_TOTALE_BV[i]
25          van = 0
26          n = periode_retour
27          while n <= N:
28              van +=
29                  (VA * (1 + inflation) ** (n)) / ((1 + taux_actualisation) ** (n))
30              n += periode_retour
31          van_distribution.append(van)

```

A.5.4 Calcul des indices de Sobol

```

1  #indices de Sobol
2
3  import numpy as np
4
5  # Y_A = VAN pour la matrice A
6  Y_A = run_van_per_row(A)
7  # Y_B = VAN pour la matrice B
8  Y_B = run_van_per_row(B)
9
10 L = len(Y_A)
11
12 sobol_indices = []
13
14 for idx, H in enumerate(hybrids):
15     Y_H = run_van_per_row(H) # VAN pour la matrice hybride
16     # Premier ordre Sobol approximatif
17     #S_i = np.cov(Y_A, Y_H, bias=True)[0, 1] / np.var(Y_A)
18     S_i = ((np.sum(Y_B*Y_H)/L)-(np.sum(Y_B*Y_A)/L)) / ((np.sum(Y_A*Y_A)/L) -
19         ((np.sum(Y_A)/L)*(np.sum(Y_B)/L))) #Formule dans le papier de St Geours

```

```

20 ST_i = (np.sum((Y_A-Y_H)**2)/(2*L)) / ((np.sum(Y_A*Y_A)/L)-
21      ((np.sum(Y_A)/L)*(np.sum(Y_B)/L))) #Formule dans le papier de St Geours
22 sobol_indices.append(S_i)
23 print(f"Indice de Sobol premier ordre matrice hybride {idx}~: {S_i:.4f}")
24 print(f"Indice de Sobol total matrice hybride {idx}~: {ST_i:.4f}")

```