



HAL
open science

Étude d'impacts des changements climatiques et socioéconomiques sur la ressource en eau, à l'échelle d'un bassin versant des Pyrénées Orientales : Le Tech

Daphney Dagneaux

► **To cite this version:**

Daphney Dagneaux. Étude d'impacts des changements climatiques et socioéconomiques sur la ressource en eau, à l'échelle d'un bassin versant des Pyrénées Orientales : Le Tech. Milieux et Changements globaux. 2010. dumas-00748510

HAL Id: dumas-00748510

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00748510>

Submitted on 5 Nov 2012

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

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

MÉMOIRE

Présenté par M^{elle} DAGNEAUX Daphney

Dans le cadre de la dominante d'approfondissement : IDEA (Ingénierie de l'Environnement, Eau, Déchets et Aménagements durables)

Etude d'impacts des changements climatiques et socio-économiques sur la ressource en eau, à l'échelle d'un bassin versant des Pyrénées Orientales : Le Tech.

Pour l'obtention du :

DIPLÔME D'INGENIEUR d'AGROPARISTECH
Cursus ingénieur agronome
et du **DIPLÔME D'AGRONOMIE APPROFONDIE**

Stage effectué du 08 / 03 / 2010 au 03 / 09 / 2010

A : BRGM – SGR / LRO (Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Service Géologique Régional Languedoc-Roussillon) – 1039 rue de Pinville 34 000 MONTPELLIER, FRANCE.

Enseignant responsable : Mr MICHELIN Joël Maître de stage : Mr CABALLERO Yvan

Soutenu le : Mercredi 22 Septembre 2010

SOMMAIRE

| | |
|---|----|
| Introduction..... | 1 |
| 1. Contexte et présentation de la problématique..... | 1 |
| 1.1. Présentation de la problématique | 1 |
| 1.2. Présentation de l'organisme d'accueil | 3 |
| 1.3. Présentation de la zone d'étude | 3 |
| 1.3.1. Situation géographique | 3 |
| 1.3.2. Contexte géologique | 5 |
| 1.3.3. Contexte climatique | 5 |
| 1.3.4. Fonctionnement hydrologique..... | 6 |
| 1.3.5. Contexte socio-économique..... | 6 |
| 2. Modélisation hydrologique au temps présent..... | 8 |
| 2.1. Méthodologie..... | 8 |
| 2.1.1. Présentation du logiciel de modélisation hydrologique utilisé : Tempo..... | 9 |
| 2.1.2. Présentation des données d'entrée des modèles..... | 10 |
| 2.2. Démarche de modélisation hydrologique..... | 15 |
| 2.2.1. Eléments de méthodologie | 15 |
| 2.2.2. Indicateurs statistiques utilisés pour déterminer la qualité du calage des modèles sur le temps présent..... | 16 |
| 2.3. Modélisation des débits dans le sous bassin versant de Reynès | 16 |
| 2.3.1. Calage du modèle | 16 |
| 2.3.2. Validation du modèle | 19 |
| 2.3.3. Analyse des incertitudes associées au modèle utilisé..... | 20 |
| 2.4. Modélisation des débits dans le sous bassin versant d'Argelès..... | 21 |
| 2.4.1. Conceptualisation du modèle..... | 21 |
| 2.4.2. Résultat du calage du modèle | 25 |
| 2.4.3. Validation du modèle | 26 |
| 2.5. Caractérisation du fonctionnement hydrogéologique du bassin versant du Tech, au vu des simulations présentes | 26 |
| 2.6. Discussion | 28 |
| 3. Impact du changement climatique sur le fonctionnement hydrologique du Tech..... | 28 |
| 3.1. Scénarios climatiques futurs : méthode d'obtention et résultats | 28 |
| 3.1.1. Méthode d'obtention des scénarios climatiques futurs | 28 |
| 3.1.2. Résultat des scénarios climatiques : évolution du climat à court et moyen terme | 30 |

| | | |
|--------|--|----|
| 3.2. | Impact des scénarios climatiques sur les débits simulés à Reynès et à Argelès | 31 |
| 3.2.1. | Impact du changement climatique sur les bilans hydriques | 31 |
| 3.2.2. | Impact du changement climatique sur les modules | 32 |
| 3.2.3. | Impact du changement climatique sur les débits mensuels moyens | 33 |
| 3.2.4. | Analyse de la significativité de la différence entre les débits simulés futurs et présents 34 | |
| 3.2.5. | Caractérisation de l'impact du changement climatique sur le fonctionnement hydrogéologique du bassin versant du Tech..... | 36 |
| 3.3. | Discussion | 37 |
| 4. | Etude de la vulnérabilité du territoire étudié aux changements climatiques et socio- économiques | 38 |
| 4.1. | Estimations des prélèvements nets en eau futurs | 38 |
| 4.1.1. | Scénarios pour l'alimentation en eau potable future | 38 |
| 4.1.2. | Scénarios pour la demande en eau agricole future | 39 |
| 4.1.3. | Six scénarios de prélèvements futurs à l'horizon 2020-2040 | 40 |
| 4.2. | Mode de caractérisation de la vulnérabilité et choix des débits d'objectifs d'étéage | 41 |
| 4.2.1. | Etude de vulnérabilité future vis-à-vis des scénarios climatiques | 44 |
| 4.2.2. | Impact de l'évolution des prélèvements sur la situation future | 47 |
| 4.3. | Discussion et perspectives | 48 |
| | Conclusion | 50 |
| | Remerciements | 51 |
| | Glossaire | 51 |
| | Liste des sigles et acronymes | 53 |
| | Bibliographie..... | 54 |
| | Annexes | 56 |

Les termes suivis du symbole ^(*) sont définis dans le Glossaire, p. 51-53.

INTRODUCTION

Le changement global peut être défini comme l'ensemble des modifications d'origine naturelle et/ou anthropique du milieu ayant des conséquences à l'échelle planétaire. Son effet sur les ressources et les usages de l'eau va se traduire de manière très différente suivant les territoires considérés. Le bassin méditerranéen se caractérise par des hydrosystèmes fortement anthropisés, où les ressources en eau souterraines ont une grande importance pour l'alimentation en eau des populations. Ces territoires sont soumis à un climat contrasté et à une pression démographique en constante augmentation. Dans ces zones, les évolutions climatiques et socio-économiques futures sont à la fois importantes, incertaines et fortement corrélées. Une prévision de ces changements et une étude des impacts potentiels de ceux-ci apparaît donc nécessaire, afin de prévoir au mieux les phénomènes à venir sur ces territoires.

Dans ce cadre, le projet VULCAIN (Vulnérabilité des hydrosystèmes soumis au Changement Global en zone Méditerranéenne) a été élaboré, dans le but de développer une méthode de modélisation intégrée des impacts des changements climatiques et socio-économiques sur les hydrosystèmes méditerranéens à moyen (2020-2040) et à long terme (2040-2060). La zone d'étude choisie se situe dans le département des Pyrénées Orientales, où l'on trouve une grande variété d'hydrosystèmes spécifiques du contexte Méditerranéen et une situation parmi les plus critiques de la région en termes d'adéquation entre les besoins en eau et les ressources disponibles.

Ce stage, réalisé au sein du BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières) s'intègre dans une phase de finalisation du projet VULCAIN. Le présent rapport expose les travaux effectués sur l'un des trois bassins versants étudiés dans le cadre du projet VULCAIN, celui du Tech.

1. CONTEXTE ET PRESENTATION DE LA PROBLEMATIQUE

1.1. PRESENTATION DE LA PROBLEMATIQUE

Le changement climatique est une question d'actualité, qui représente un vaste terrain d'étude. De nombreuses équipes de recherche concentrent leurs efforts dans le but de caractériser ses impacts, et ce à différents niveaux. Les effets du changement climatique sur la ressource en eau ont notamment été étudiés sur différents territoires. Cependant, ces études se focalisent généralement uniquement sur l'effet du changement climatique, et il est rare qu'elles intègrent une étude des impacts socio-économiques potentiels. Or, les évolutions d'ordre socio-économiques se traduisent directement par des modifications de la demande en eau. Il semble ainsi nécessaire d'intégrer une analyse de ces évolutions à ce type d'études, et ce notamment lorsque l'étude porte sur des territoires tels ceux du bassin méditerranéen, qui se caractérisent par une importante croissance démographique et une urbanisation des zones littorales, et où des conflits d'usage sont déjà visibles. En effet, si l'évolution socio-économique de ces territoires risque de se traduire par une augmentation de la demande en eau, il n'est pas aisé de déterminer la manière dont cette augmentation impactera la ressource en eau et ses différents compartiments.

Dans ce contexte, il convient de s'interroger sur le poids relatif des facteurs de changements climatique et socio-économique sur la ressource en eau et son usage. Faut-il s'inquiéter des conséquences directes du changement climatique sur les ressources en eau alors que les facteurs socio-économiques pourraient avoir un impact autant ou plus marqué à plus brève échéance ? Quelle est la vulnérabilité des territoires reliés aux hydrosystèmes exploités ou qui dépendent des ouvrages ou des structures de gestion de l'eau

existantes? Quelles stratégies d'adaptation sont possibles face à ces évolutions et comment en évaluer les coûts ? Telles sont les questions auxquelles le projet Vulcain a notamment tenté d'apporter des réponses.

Le projet VULCAIN a été élaboré dans l'objectif de mettre au point une méthode de modélisation intégrée (transdisciplinaire) des impacts des changements climatiques et socio-économiques sur les hydrosystèmes méditerranéens à moyen (2020-2040) et à long terme (2040-2060). La méthode adoptée pour atteindre l'objectif fixé pour ce projet consiste à construire en parallèle des scénarios d'évolution future du climat et des scénarios d'évolution des activités socio-économiques ayant un impact sur les ressources en eau. Ces scénarios sont construits dans le but de les appliquer en entrée de modèles du fonctionnement hydrologique des bassins versants, intégrant les mécanismes de gestion de l'eau. La complexité des relations entre les différents facteurs qui influenceront l'évolution des ressources en eau dans le futur est ainsi approchée. L'objectif est ainsi de caractériser la vulnérabilité des territoires étudiés face à l'évolution des deux grands facteurs de changements étudiés. Le projet VULCAIN est représenté sous forme de schéma à la Figure 1.

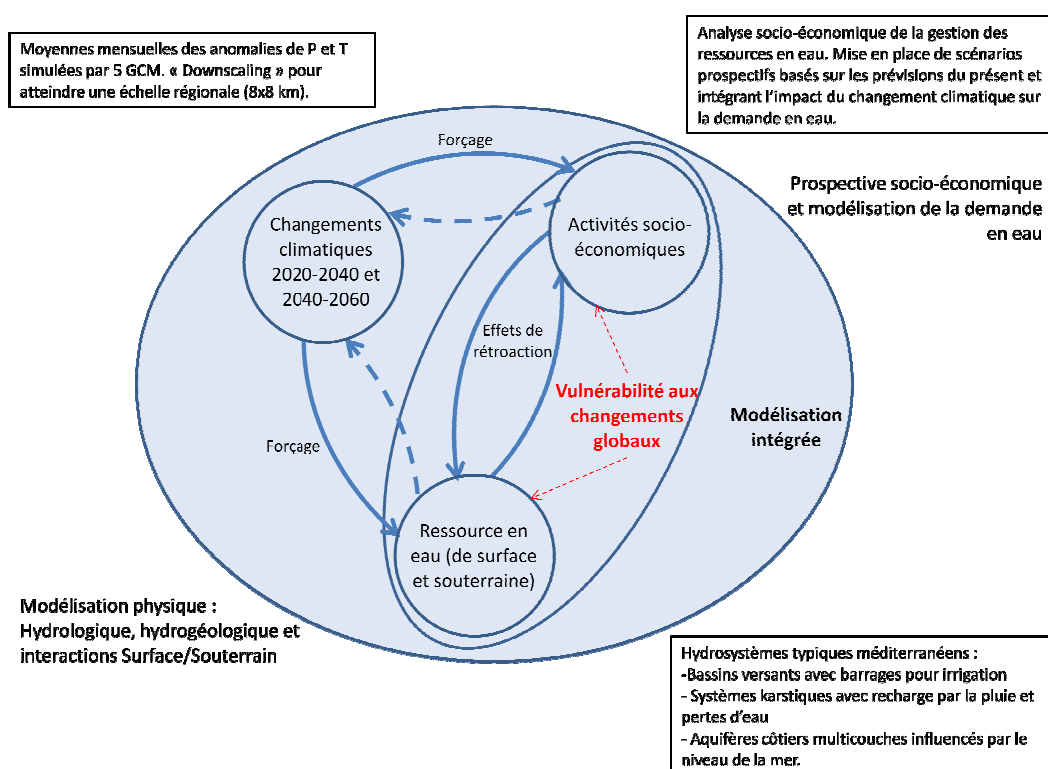


Figure 1 : Représentation schématique du projet VULCAIN. Seules les interactions représentées par des flèches en traits plein sont étudiées dans le cadre du projet.

Ce stage, dont les travaux sont exposés dans le présent rapport, s'intègre dans une phase de finalisation du projet Vulcain, dont le rendu final doit s'effectuer fin Octobre 2010. Le premier objectif de ce stage a été de déterminer les débits actuels et futurs au niveau de deux stations hydrologiques : l'une représentative du sous-bassin versant amont, à Reynès, et la seconde proche de l'exutoire du sous-bassin versant aval, à Argelès (Figure 10). Le but est ainsi de déterminer l'effet du changement climatique sur le fonctionnement hydrologique du bassin versant du Tech. Cette première partie du travail a été réalisée par l'élaboration d'une modélisation hydrologique de type pluie/débit à l'aide d'un logiciel de modélisation hydrologique, « Tempo ». Les travaux de simulations des débits à ces deux stations de mesures ont été conduits sur trois périodes de 20 ans, afin de comparer les évolutions estimées entre le « présent » (1980-2000), le futur « proche » (2020-2040) et le futur « lointain » (2040-2060).

Le deuxième grand objectif de ce stage a été d'étudier la vulnérabilité future du territoire face aux deux grands facteurs de changements, climatique et socio-économique, en termes de ressource en eau. Cette étude de vulnérabilité a été réalisée en comparant les débits futurs simulés à des débits seuils à respecter dans la rivière, en prenant en compte les usages, et en comparant l'effet du changement climatique d'une part et celui des prélèvements futurs d'autre part.

La démarche mise en place s'appuie sur des travaux antérieurs effectués par différents organismes, et notamment sur l'utilisation de données climatiques présentes et prospectives de Météo France, et de données d'estimations des débits de prélèvements établies par le bureau d'études BRLi en association avec le BRGM.

1.2. PRESENTATION DE L'ORGANISME D'ACCUEIL

Le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) est l'Etablissement Public à Caractère Industriel (EPIC) de référence dans le domaine des applications des sciences de la Terre pour gérer les ressources et les risques du sol et du sous-sol.

Parmi les grands objectifs du BRGM, figure la mise à disposition d'outils nécessaires à la prévention des risques naturels et aux politiques de réponse au changement climatique, dans lequel s'inscrit le projet VULCAIN. Le BRGM revendique des compétences en recherche appliquée s'appuyant notamment sur l'exploration de nouvelles méthodologies d'évaluation de la vulnérabilité et la mise en place d'approches transdisciplinaires innovantes. Le projet VULCAIN en est l'illustration, utilisant la complémentarité d'équipes de météorologistes, de modélisateurs en hydrologie et d'économistes de l'environnement.

1.3. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Les caractéristiques physiographiques d'un bassin versant et, de même, les différents aménagements qui s'y trouvent influencent fortement sa réponse hydrologique à une sollicitation météorologique donnée (Musy & Higy, 2004). Les propriétés pédologiques et géologiques des bassins, leur couverture végétale, leur topographie ou leur contexte climatique sont déterminants pour les débits d'étiage. Il paraît donc nécessaire de bien caractériser toutes ces propriétés de la zone étudiée avant de mettre en place des travaux de modélisation.

1.3.1. Situation géographique

Le projet VULCAIN étudie le territoire des Pyrénées Orientales, département français à l'extrême sud de la France, limitrophe de l'Espagne et situé sur le pourtour méditerranéen.

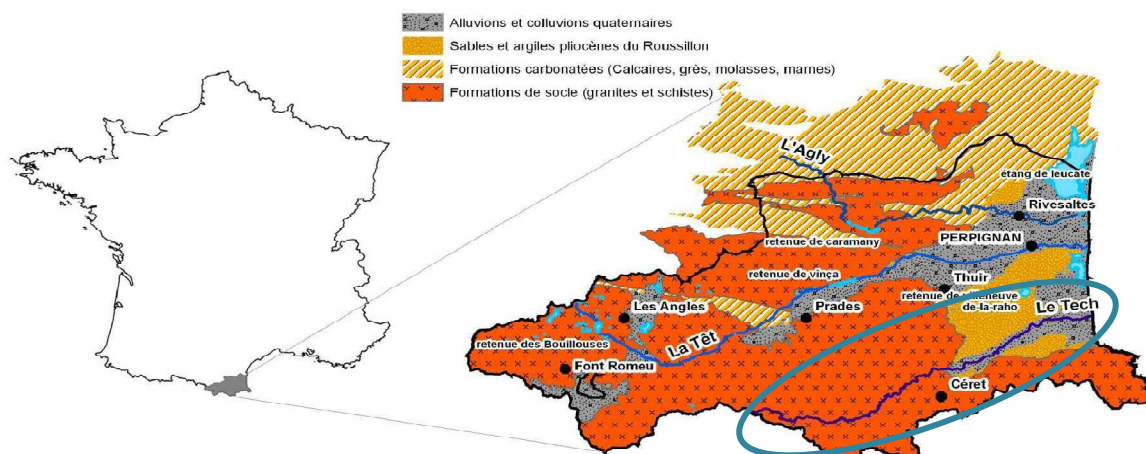


Figure 2 Le département des Pyrénées Orientales (66) - situation et représentation des grandes formations géologiques de la zone, composée de trois bassins versants principaux : Le Tech, La Têt et l'Agly. La zone entourée est celle étudiée dans le présent rapport : le bassin versant du Tech. 3

Ce rapport présente plus précisément le travail effectué sur l'un des trois bassins versants constitutifs de la zone d'étude du projet Vulcain : le bassin versant du Tech (Figure 2).

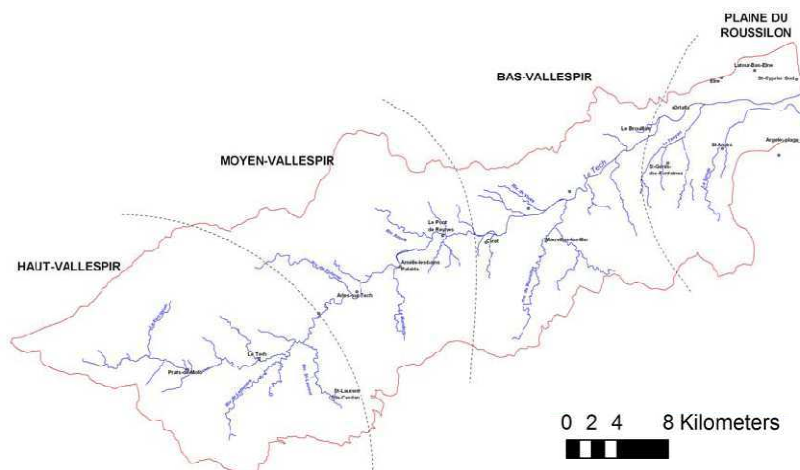


Figure 3 : Cartographie du Tech, de ses affluents, de la délimitation du bassin versant et des sous-unités géographiques.

La vallée du Tech constitue le bassin versant français le plus méridional. Ce bassin versant a la particularité de recouper des unités géographiques contrastées.

Le Tech est un fleuve côtier des Pyrénées Orientales qui s'écoule d'Ouest en Est. Prenant sa source à 2345 mètres d'altitude, dans le massif du Costabonne, il draine sur un parcours de 85 km un bassin versant de 723,4 km², associant montagne et plaine, avant d'atteindre la mer Méditerranée, où il se jette, au niveau d'Argelès. Le bassin versant du Tech est délimité, au sud, par la ligne de crête allant du Massif des Albères au Costabonne et au Nord par la ligne de crête du Massif du Canigou et des Aspres.

Le bassin versant du Tech comprend deux sous ensembles très différenciés (Figure 3) :

- En **amont** : le Vallespir, composé du haut Vallespir et du moyen Vallespir (des sources du Tech à Céret). Sur cette portion, le substratum est montagneux, à pentes abruptes aujourd'hui très boisées et le réseau hydrographique est de type torrentiel.
- En **aval** : la plaine du Roussillon, composée du bas Vallespir, et de la plaine du Roussillon. Cette plaine s'élargit progressivement entre Céret et la mer. Elle est couverte de terres cultivées, traversées par le fleuve du Tech relativement assagi et apparemment circonscrit dans son lit mineur^(*) recalibré^(*).

Ces deux unités géographiques contrastées se retrouvent dans le fonctionnement et la morphologie du cours d'eau (Figure 4).



Figure 4 : Photographies du cours d'eau du Tech, prises en différents endroits.
D'amont en aval :
a. Le Tech non loin de ses sources.
b. Le Tech en aval de Céret.
c. Le Tech aval au niveau d'Elne.
d. L'embouchure du Tech.

Source : <http://www.vallee-du-tech.com/siv-1100.php?CatID=2&ArtID=9>

Le Tech présente une forte pente dans sa section amont : 11,5% à l'amont de Parcigoule, environ 8% jusqu'à Amélie les Bains, qui diminue sensiblement jusqu'à Céret (1,75%), avant de se stabiliser à 0,3% à l'aval, permettant le raccord au niveau marin. Le réseau hydrographique est bien hiérarchisé, avec un chevelu de cours d'eau élémentaires très fourni, alimentant de nombreux affluents importants qui fournissent au Tech une grosse partie de ses débits. Le Tech reçoit ses principaux affluents dans son parcours montagneux (entre Prats-de-Mollo et Céret). (SIEE, 2006)

Cette disposition dichotomique du bassin versant du Tech conditionne également étroitement l'organisation des différents facteurs de l'environnement et de l'aménagement, notamment en ce qui concerne le climat, l'aptitude à la mise en valeur des sols agricoles, la ressource thermique, l'évolution démographique et les risques naturels...

1.3.2. Contexte géologique

Dans la partie amont du bassin versant du Tech, le socle métamorphique et cristallin (schistes, gneiss et granites) qui constitue le substrat est peu perméable dans l'ensemble, et les pertes y sont insignifiantes (Figure 5).

En revanche, en aval, la plaine est un bassin sédimentaire d'âge Pliocène sur lequel le Tech a déposé des alluvions en terrasses emboîtées au quaternaire. Les terrains pliocènes ainsi que les alluvions des terrasses hautes et moyennes du Tech ont une perméabilité faible. En aval de Céret, le Tech s'écoule au sein des alluvions récentes, qui contiennent une nappe alluviale qui influence le fonctionnement hydrologique du Tech sur la partie aval.

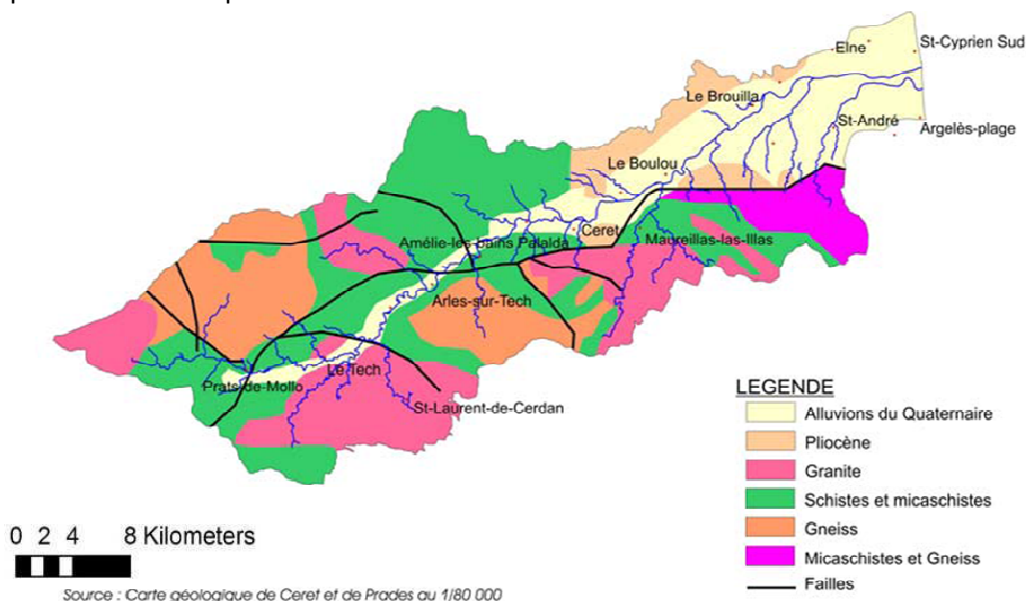


Figure 5 : Carte géologique simplifiée du bassin versant du Tech.

1.3.3. Contexte climatique

Le climat de la vallée du Tech s'organise suivant les grandes unités géographiques décrites.

Dans la basse plaine du Roussillon, le climat est de type méditerranéen avec des hivers doux, des étés chauds et secs, une durée d'ensoleillement importante et des vents fréquents et violents. Cette partie du bassin versant est ainsi relativement épargnée par les pluies ; la proximité du massif des Albères provoque cependant l'occurrence de précipitations non négligeables. Les principales pluies se produisent en automne (Octobre) et au printemps (Mars).

En amont, la vallée du Vallespir, excepté les hauts massifs, connaît pour sa part un climat méditerranéen dit altéré, du fait de l'absence de saison sèche. Cette zone de moyenne vallée est relativement abritée des grands vents qui soufflent sur la basse plaine ; elle bénéficie d'un grand ensoleillement, de températures douces, et de précipitations intenses et fréquentes. Une grande variabilité interannuelle affecte cependant les précipitations dans cette zone, bien qu'elles soient mieux réparties au cours de l'année que dans les basses plaines.

La vallée du Tech enregistre les plus fortes précipitations du département des Pyrénées Orientales, du fait de sa situation méridionale, de son orientation favorisant la pénétration des vents humides et de son relief montagneux. Le relief joue un rôle essentiel de barrière orographique, concentrant les précipitations les plus fortes sur le tiers central du bassin versant, tandis que la plaine et le haut bassin sont relativement protégés. Les moyennes annuelles de précipitations décroissent vers l'aval : elles sont deux fois supérieures dans le Vallespir que sur la plaine du Roussillon.

1.3.4. Fonctionnement hydrologique

1.3.4.1. Régime hydrologique

Le régime hydrologique du Tech est relativement bien connu car il existe de nombreuses stations de mesures sur son cours. Il présente des débits très soutenus en Avril -Mai (fonte des neiges) et Octobre-Novembre (pluviométrie élevée), et un étiage en Août/Septembre retardé par les orages d'été. Il possède un régime légèrement nival qui confère aux mois de Mai-Juin des hautes eaux régulières. La variabilité interannuelle est très forte, comme celle des précipitations.

Les écoulements sont en majeure partie alimentés par les précipitations pluvieuses, l'infiltration étant réduite sur toute la partie amont du fait de la faible perméabilité des terrains.

On note aussi une tendance à la réduction des débits de l'amont vers l'aval en période de prélèvements à cause des prélèvements pour l'irrigation (présence de canaux d'irrigation).

1.3.4.2. Événements extrêmes

Compte tenu de sa situation géographique par rapport aux circulations atmosphériques et de son caractère montagnard, le bassin versant est l'un des plus arrosés du sud de la France, et le Tech connaît fréquemment de grandes crues et plus rarement des événements extrêmes.

Malgré une occupation du sol plutôt favorable (urbanisation peu développée, couvert végétal important), les facteurs climatiques (fortes précipitations), morphologiques (raideur des versants) et géologiques (imperméabilité, très forts ruissellements de surface) restent prédominants. Le facteur ruissellement prenant largement le pas sur l'infiltration, les crues dépendent des caractéristiques des précipitations.

Les risques liés à ces crues présentent des caractéristiques très différentes entre l'amont et l'aval. En effet, alors qu'ils sont circonscrits dans un espace de mobilité étroit à l'amont, ils concernent la plus grande partie des plaines alluviales^(*) à l'aval.

1.3.5. Contexte socio-économique

1.3.5.1. Anthropisation des milieux

1.3.5.1.1. Occupation du sol du bassin versant du Tech

Le bassin versant du Tech est relativement peu anthropisé. Les espaces boisés représentent environ 60 % du bassin versant. La vallée du Tech compte environ 60 000 habitants. Ceux-ci sont essentiellement répartis sur la zone aval, qui possède les communes les plus importantes et bénéficie de la proximité du pôle d'activité économique de Perpignan. En effet, une dichotomie très nette, qui se calque assez bien sur la répartition des pentes, apparaît entre la plaine du Roussillon, fortement anthropisée, et les massifs montagneux du Vallespir et des Albères (Figure 6).

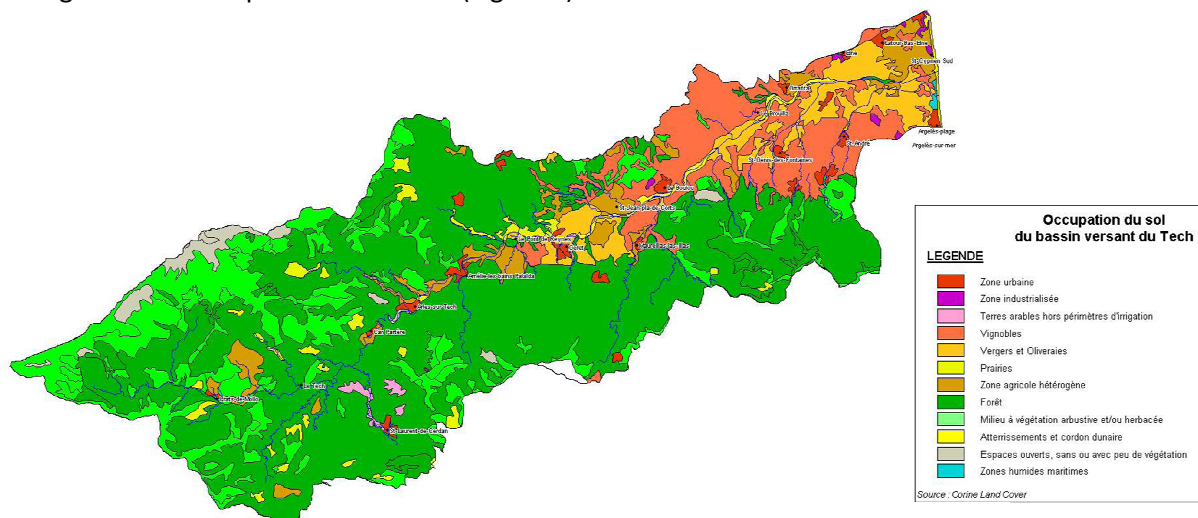


Figure 6 : Occupation du sol du bassin versant du Tech. Source : Corine Land Cover, (SIEE, 2006)

1.3.5.1.2. Aménagements des cours d'eau

Le cours du Tech est encore assez peu artificialisé et n'est pas régulé par barrage. De nombreux aménagements y ont cependant été réalisés, et ce à des fins multiples :

- Protection contre les crues : digues, enrochements, tronçons recalibrés...
- Besoins en irrigations : construction de canaux
- Développement des infrastructures (routières...)

1.3.5.2. Un riche patrimoine naturel

Les conditions de milieu très variées offrent à la vallée du Tech un patrimoine naturel et paysager d'une grande richesse. La présence d'une grande diversité de milieux sur un territoire de taille modeste induit une quantité importante d'espèces différentes aussi bien au niveau de la faune que de la flore. Le mélange des influences méditerranéennes et montagnardes crée des conditions de milieu particulièrement propices à l'endémisme. Cette richesse patrimoniale se retrouve dans chaque entité géographique du bassin versant. Cependant, alors qu'en partie amont, montagnarde, les écosystèmes témoignent d'une richesse écologique marquée, un déséquilibre écologique du Tech aval est à déplorer. En effet, à l'aval de Céret, la flore et la faune liées à l'eau sont fortement affectées à la fois par la diminution des débits d'étiage^(*), l'impact des pollutions et la morphologie du lit aplani par les aménagements (SIVU, 2010).

1.3.5.3. Développement économique de la vallée du Tech

Au titre des atouts pour son développement, le bassin versant peut s'appuyer sur une attractivité évidente basée d'une part sur le thermalisme, avec des stations de grande renommée, et d'autre part sur un arrière pays riche historiquement et culturellement. Ainsi, le bassin versant présente la particularité, pour un espace méditerranéen, de ne pas être réduit à son cordon littoral.

Quant à l'agriculture, elle reste, malgré la crise actuelle, une activité économique importante, avec la présence en plaine de sols d'excellente qualité. En effet, la mise en valeur agricole des sols est très bonne dans les plaines aval, qui bénéficient de sols profonds et de la présence d'eau en abondance. Vigne AOC, maraîchage et fruitiers constituent les cultures principales dans le bassin versant. En revanche, la mise en valeur agricole est très médiocre dans la partie montagneuse, aux pentes abruptes et aux sols souvent très pauvres.

Par ailleurs, dans le cadre d'une gestion durable, la vallée possède des ressources en eau et en matériaux de construction en volumes suffisants pour accompagner le développement économique de ce territoire. La proximité de l'Espagne ainsi que les grands axes de circulation qui desservent la vallée du Tech représentent également des atouts non négligeables (SIVU, 2010).

1.3.5.4. Une gestion globale du Tech coordonnée par un syndicat de bassin versant

Le bassin versant du Tech compte 39 communes, dont 36 sont adhérentes du Syndicat du Tech.

Le Syndicat du Tech, structure coordinatrice du Contrat de Rivière Tech, est garant d'une concertation élargie avec de nombreux acteurs et structures locales du territoire dans le cadre de la mise en œuvre d'une gestion équilibrée de l'eau. La diversité des problématiques liées à l'eau sur la vallée du Tech implique une multiplicité d'acteurs spécialisés et pluridisciplinaires. Une coordination des actions est donc indispensable, notamment dans le cadre de l'entretien des cours d'eau,... Sur le bassin versant du Tech, l'entretien joue un rôle important dans la mise en œuvre d'une politique globale de lutte contre les inondations mais également dans le développement de l'attractivité touristique du territoire et la conservation d'usages locaux.

C'est sur la zone d'étude présentée dans cette première partie que le travail mené au cours de ce stage a été réalisé. La première partie de l'étude a consisté à établir une modélisation, sur le temps présent, afin de reproduire les débits en amont et en aval du Tech.

2. MODELISATION HYDROLOGIQUE AU TEMPS PRESENT

2.1. METHODOLOGIE

Etant donné la géographie dichotomique de la zone d'étude ainsi que les stations de mesures opérationnelles réparties sur le Tech, le bassin versant a été subdivisé en deux sous bassins versants pour réaliser l'étude :

- En amont : de la source du Tech jusqu'à la station de mesure de débit de **Reynès**, non loin de Céret, qui se situe à la limite entre les deux grandes entités géographiques identifiées au sein de la zone d'étude. Ce sous bassin versant amont a une superficie de 487,7 km².
- En aval : de Reynès à la station située au niveau du pont d'Elne, près d'**Argelès**. Ce sous bassin versant aval représente une superficie de 235,7 km², et correspond à la zone de plaine.

La délimitation a été faite de manière à disposer, sur chaque sous bassin, d'un contexte hydro-climatique et géologique le plus homogène possible. Les écoulements sur chaque sous-bassin sont contrôlés par une station hydrométrique située à leur exutoire.

L'ensemble de notre démarche d'étude du bassin versant du Tech est donc réalisée sur chacun des sous bassins versants présentés ci-dessus.

2.1.1. Présentation du logiciel de modélisation hydrologique utilisé : Tempo

La démarche de modélisation s'est appuyée sur un logiciel, développé par le BRGM : « Tempo ». Tempo est un logiciel destiné au traitement et à la modélisation des séries temporelles en hydrogéologie et en hydrogéochimie. Il s'appuie sur des acquis en matière de traitement du signal ainsi que des techniques d'inversion et de régularisation utilisées dans différentes disciplines, dont la géophysique. Ce logiciel peut être appliqué à diverses données, et notamment des chroniques pluie/débit d'un bassin versant ou des chroniques pluie/niveau piézométrique. (Pinault, 2001)

Les traitements peuvent conduire à la caractérisation du fonctionnement d'un système, à la modélisation inverse des phénomènes ou bien à leur simulation. La « modélisation inverse » vise à reproduire un débit, un niveau piézométrique, à partir d'une chronique de pluie et d'ETP (ou de température moyenne journalière).

Contrairement à la modélisation directe, qui consiste à reproduire le fonctionnement d'un hydrosystème à partir de concepts reposant à la fois sur la description de cet hydrosystème et l'application de lois physiques, la modélisation inverse déduit le fonctionnement du système de l'analyse des données. En effet, Tempo n'offre pas de représentation physique du système étudié, mais permet de propager les descriptions des processus en jeu au travers de la construction de fonctions de transfert. Les fonctions de transfert, à deux composantes (une lente et une rapide), sont construites à partir des chroniques de données enregistrées au droit des stations de mesures présentes sur le terrain et représentatives des débits en rivière (hydrométrie), des hauteurs de précipitations (pluviométrie) et de l'évapotranspiration (ETP), ou encore du niveau des nappes souterraines (piézométrie). (Figure 7) (DREAL Nord-Pas de Calais, 2010)

Lorsque plusieurs réponses impulsionnelles indépendantes sont nécessaires à la modélisation, le système est dit non linéaire. Ce système peut également avoir plusieurs entrées, ce qui permet de séparer les contributions des différentes entrées sur la sortie. Ainsi, un débit peut être reproduit à partir d'une séquence de pluie et d'ETP, mais également du niveau piézométrique d'une nappe contribuant à l'alimentation et/ou au drainage d'un cours d'eau. Le simulateur peut également fonctionner en cascade : un niveau piézométrique calculé à partir d'une séquence de pluie efficace simulée peut être utilisé pour le calcul du débit d'un cours d'eau de manière à prendre en compte les interactions nappe/rivière.

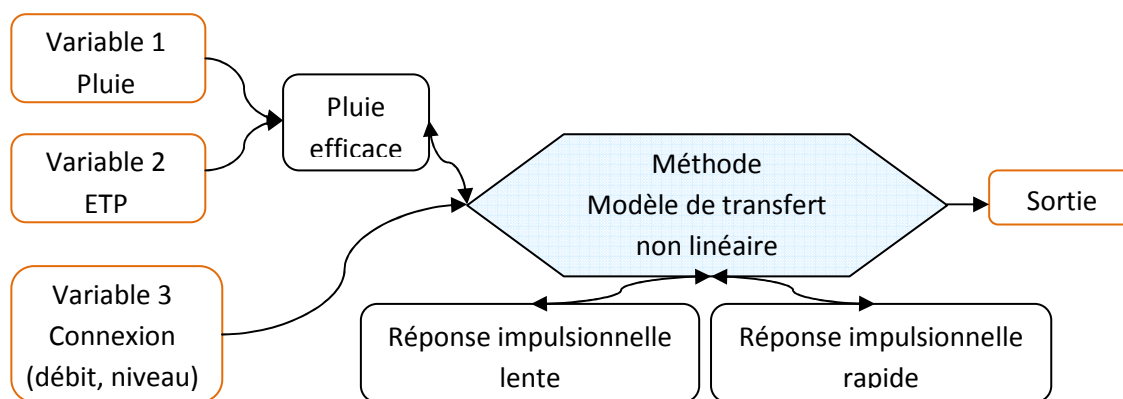


Figure 7 : Organigramme d'un modèle de transfert non linéaire pouvant être mis en place sous le logiciel Tempo : deux réponses impulsionnelles sont utilisées. Les variables observées sont en rouge.

Afin d'adapter la modélisation à la réalité des observations, la modélisation doit subir un calage des fonctions de transfert. Cette étape nécessite une analyse critique des données utilisées, croisée à une analyse qualitative des propriétés hydrogéologiques des bassins.

La modélisation simplifie le système réel et peut se trouver altérée par différents facteurs liés à la représentativité des stations ou à la précision des données. Il est donc nécessaire de garder en mémoire les **limites** de la représentation qui est faite au travers de la modélisation du système.

2.1.2. Présentation des données d'entrée des modèles

2.1.2.1. Données de débits

Les données de débits observés dans le Tech, utilisées pour caler les modèles, sont issues de la banque « HYDRO » (Banque Hydro, 2010). Hydro stocke les mesures de hauteur d'eau en provenance de 3500 stations de mesure implantées sur les cours d'eau français et permet un accès aux données signalétiques des stations. A partir des valeurs de hauteur d'eau mesurées et grâce aux courbes de tarage (relation entre les hauteurs et les débits), Hydro calcule sur une station donnée les débits instantanés, journaliers, mensuels... (Banque Hydro, 2010)

Le calage des modèles mis en place afin de reproduire les débits dans le cours d'eau du Tech a été effectué à partir des données de débits journaliers aux stations de Reynès et d'Argelès, extraites de la banque Hydro.

L'étude des débits au niveau de Reynès s'appuie sur des données journalières issues de la station de Reynès [Saint Paul sur Tech, code de station : Y025050], dont l'étendue temporelle est de 1970 à 2004. L'étude des débits au niveau d'Argelès s'appuie sur des données journalières issues de la station d'Argelès [pont d'Elne, code de station : Y0284060], dont l'étendue temporelle est de 1976 à 2007.

Hydro fournit les valeurs d'écoulement les plus exactes possibles compte tenu des informations que lui communiquent les gestionnaires des stations. Les valeurs de débits fournies par cette banque de données n'est cependant pas optimale. Ainsi, dans la banque de données, est associée aux données de débits fournies une codification illustrant la fiabilité de chaque valeur, ce qui permet d'avoir une idée de l'incertitude liée aux données mises à disposition.

2.1.2.2. Données de piézométrie

L'existence d'une nappe alluviale dans la partie aval du bassin versant, induisant des transferts nappes-rivière, a nécessité la caractérisation de ces transferts, passant par l'étude du niveau piézométrique dans la nappe alluviale. Une station de relevé de niveau piézométrique a été identifiée sur la zone d'étude, au niveau d'Ortaffa. Ces données ont donc été extraites (Figure 19), à partir du portail d'accès aux eaux souterraines (ADES, 2010). Il s'agit d'un piézomètre qui porte le code national 10971X0198/CAFAR (référéncé dans la Banque des sous-sol gérée par le BRGM (Infoterre, 2010)). D'une profondeur de 11 mètres, ce piézomètre est implanté dans les alluvions du Tech. Il est équipé d'une centrale d'acquisition permettant le suivi des fluctuations piézométriques journalières de la nappe alluviale depuis Mars 2000.

2.1.2.3. Données climatiques

- Utilisation des données SAFRAN, établies par Météo France

Les données du climat présent ont été obtenues à partir de l'analyse météorologique SAFRAN (Quintana-Seguí et al., 2008). Il s'agit d'une analyse à méso-échelle utilisant l'ensemble des données météorologiques au sol disponibles dans les bases de données de Météo-France pour estimer les différentes variables atmosphériques utilisées ici (température, pluie et neige) sur une grille régulière de 8x8 km (Figure 8). En outre, une évapotranspiration potentielle a été calculée à partir de ces données

pour les modèles hydrologiques. Une base de données météorologique couvrant la période 1970 à 2006 a ainsi été établie.

Une analyse des données climatiques recueillies sur une période de 1970 à 2005 a été réalisée dans le cadre du projet Vulcain. Nous reprenons ici les conclusions de ces études.

Des modifications du régime climatique ont été mises en évidence sur les 40 dernières années à l'échelle globale. Une tendance à l'augmentation générale des températures, particulièrement importante en été et à une diminution des précipitations a été observée sur les régions méditerranéennes (Trenberth & al., 2007), (Chaouche & al., 2010). Plus précisément, sur la zone d'étude et sur la période 1970-2005, à l'échelle annuelle, seules les températures et l'ETP présentent des non-stationnarités significatives, à la fois sur les moyennes et sur les cumuls, qui ont tendance à augmenter. On chiffre à environ 1.5°C en 35 ans la hausse des températures moyennes annuelles sur la zone étudiée. A l'échelle saisonnière, deux tendances inverses apparaissent, concernant les précipitations : hausse des cumuls automnaux et baisse sur ceux d'été. Les températures et ETP présentent une tendance significative à la hausse en toutes saisons, mais elle se concentre particulièrement sur les saisons chaudes. Une représentation de ces résultats est proposée en Annexe 1.

Des évolutions climatiques ont ainsi été mises en évidence sur les 40 dernières années, sur la zone d'étude. Dans la suite de notre démarche, nous nous sommes concentrés sur une période plus restreinte de 20 ans, de 1980 à 2000, afin de comparer les caractéristiques climatiques et hydrologiques actuelles à celles prédites pour le futur à court terme (2020-2040) et à plus long terme (2040-2060).

Nous avons ainsi calculé les chroniques climatiques représentatives de chaque sous-bassin versant du Tech, pour la période 1980-2000.

- Calcul des chroniques climatiques sur le bassin versant étudié

A partir de ces différentes variables propres à chaque maille de la grille SAFRAN, il a fallu créer une variable climatique propre à chaque sous bassin versant, pour chaque variable climatique étudiée (pluie, température, neige et ETP), représentative de chaque sous bassin versant étudié. Ce calcul a été effectué par combinaison linéaire des variables propres à chaque maille, affectées d'un poids égal au rapport entre la surface de sous bassin versant interceptée par la maille considérée, et la surface totale du sous bassin versant considéré (Figure 8).

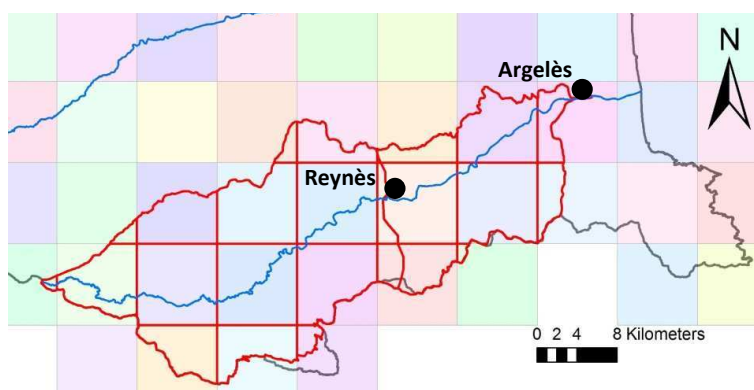


Figure 8 : Croisement entre les mailles SAFRAN et les délimitations des deux sous bassins versants du Tech. La grille régulière représentée en rouge correspond aux délimitations des mailles SAFRAN de 8*8km de côté. Les points noirs représentent les stations de mesures de Reynès et d'Argelès.

Les résultats de ces calculs sont présentés Figure 9.

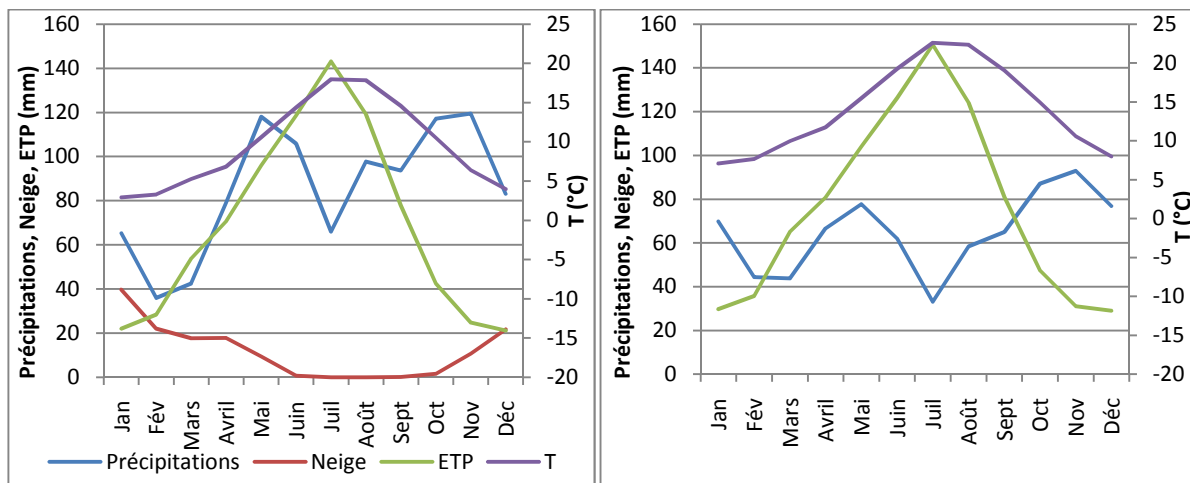


Figure 9 : Données de précipitations (bleu), température (violette), ETP (vert) et neige (rouge), sur les deux sous-bassins versant du Tech (a. : Reynès, b. : Argelès) ; moyennes mensuelles calculées sur la période 1980-2000.

La Figure 9 nous permet de remarquer qu'en moyenne, sur la période 1980-2000, les précipitations sont moins importantes sur le sous bassin versant d'Argelès que sur le sous bassin versant de Reynès, et ce du mois d'Avril au mois de Septembre. Cette différence est notamment de l'ordre de 30% en période estivale. Concernant la neige, alors que nous considérons les chutes anecdotiques dans le sous bassin versant d'Argelès, elles représentent en moyenne 15% des précipitations totales dans le sous bassin versant amont ; elles sont logiquement centrées sur la période hivernale. Les températures moyennes sont quant à elles plus élevées à Argelès, la différence étant de l'ordre de 30% en moyenne, sur l'année. Ainsi, l'ETP est également plus importante dans le sous bassin versant d'Argelès, la différence représentant environ 10%.

2.1.2.4. Données de prélèvements

Afin de pouvoir construire des modèles hydrologiques, il est nécessaire de caractériser, en plus des données météorologiques et de débit, l'importance des prélèvements qui affectent les hydrosystèmes. L'estimation des prélèvements actuels a été réalisée par le bureau d'études BRLi (Bas Rhône Languedoc ingénierie).

L'eau prélevée dans les rivières et dans les nappes peut être utilisée pour l'alimentation en eau potable, l'agriculture, l'industrie ou le tourisme. Dans le cadre de ce projet, deux grands postes de prélèvements, correspondant aux usages majoritaires, ont été retenus : l'alimentation en eau potable et l'irrigation (usage agricole). Les débits des prélèvements alloués à chacun de ces deux grands usages ont été estimés de manière distincte, par BRLi.

Les estimations de prélèvements pour l'eau potable et l'irrigation n'ont pu être réalisées que sur la période 2000-2005, l'accès à des historiques fiables sur une période plus étendue étant très rarement possible. Ces estimations ont été faites par l'intermédiaire de modèles simples, de manière à pouvoir les utiliser pour calculer les prélèvements futurs.

2.1.2.4.1. Prélèvements pour l'alimentation en eau potable

Les besoins pour l'alimentation en eau potable ont été calculés par BRLi sur la zone d'étude, selon la formule suivante :

$$\text{Besoins annuels (année n)} = \frac{\text{ratio de consommation (année réf)} \times \text{population équivalente (année n)}}{\text{« rendement » (année n)}}$$

le ratio de consommation représentant la consommation moyenne d'un équivalent.habitant sur la zone considérée ; la population équivalente, la population totale participant à la consommation en eau, lissée sur une année ; et le rendement, le ratio du volume d'eau facturé sur le volume d'eau prélevé (pour plus de détails sur le calcul de ces différents termes, se référer à l'Annexe 2).

Ces calculs ont été réalisés en se basant sur des données d'archives de différentes communautés de communes ou entreprises sous-traitantes (Veolia, SAUR...), chargées de l'alimentation en eau potable des communes de la zone d'étude, mais également sur des données recueillies au niveau de l'Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse. Le pas de temps annuel n'est pas assez fin pour examiner l'impact des prélèvements sur la ressource en eau. Aussi, la reconstitution des prélèvements a été menée au pas de temps mensuel.

2.1.2.4.2. Prélèvements pour l'irrigation

De même que pour les prélèvements pour l'alimentation en eau potable, un modèle des prélèvements et des demandes en eau agricole au pas de temps mensuel a été construit dans le cadre du projet par BRLi. Son objectif est de déterminer, à l'échelle des zones hydrologiques élémentaires du projet, et notamment sur les deux sous bassins versant du Tech, les prélèvements, bruts et nets, actuels. Les prélèvements bruts correspondent à la quantité totale prélevée dans le milieu. Les prélèvements nets correspondent aux prélèvements bruts auxquels est retranchée la part de l'eau prélevée qui retourne aux rivières ou aux nappes. L'importance des retours est estimée, sur dires d'experts, en fonction du type de prélèvement et des contextes hydrologique et hydrogéologique.

En parallèle de l'estimation des prélèvements nets, ce modèle établit un calcul agro-climatique théorique des besoins en eau des plantes. Cette double approche permet de différencier la part de la demande liée au climat et aux choix culturaux de la part de la demande liée aux modes d'adduction et d'irrigation et à la gestion des systèmes (pour plus de détails sur les calculs de ces différents termes, se référer à l'Annexe 3). La Figure 10 présente les différents termes de la demande en eau agricole pour le bassin versant du Tech. On peut notamment constater l'importance des retours dans le milieu par rapport aux volumes que représentent les prélèvements bruts. Ceci explique que les prélèvements nets dans la partie aval du Tech soient négatifs.

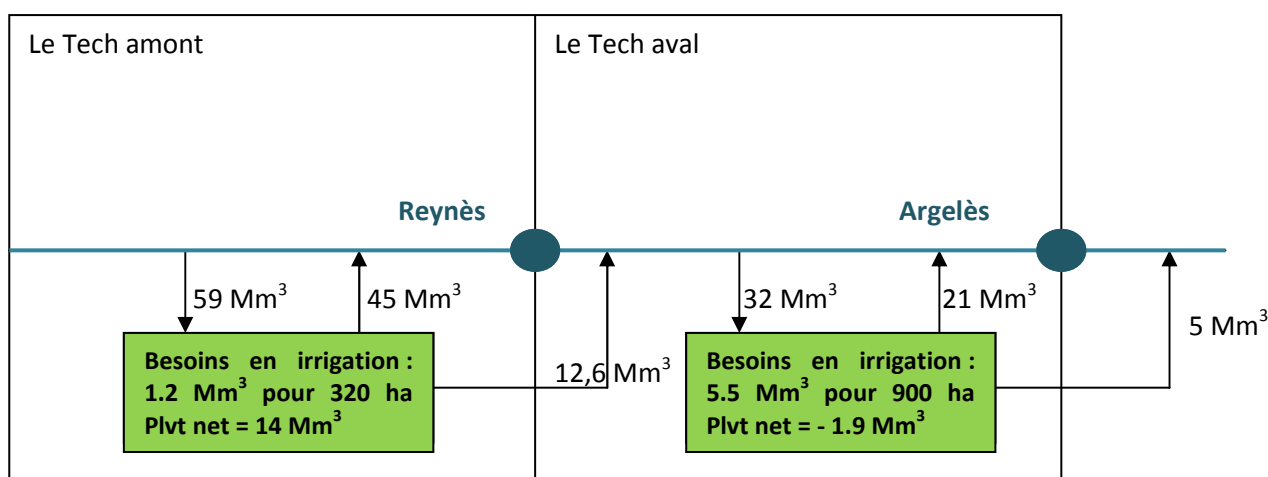


Figure 10 : Représentation schématique des volumes de prélèvements et des retours estimés dans les sous bassins versants de Reynès («Le Tech amont») et d'Argelès sur Mer («Le Tech aval»).

2.1.2.4.3. Résultats des estimations rétrospectives de débits de prélèvements

Les débits de prélèvements pour l'alimentation en eau potable et pour l'usage agricole, ont été estimés par BRLi pour chacun des sous-bassins versant étudiés : Reynès et Argelès. Les résultats de ces travaux, utiles à notre démarche ultérieure de modélisation, sont présentés ci-dessous.

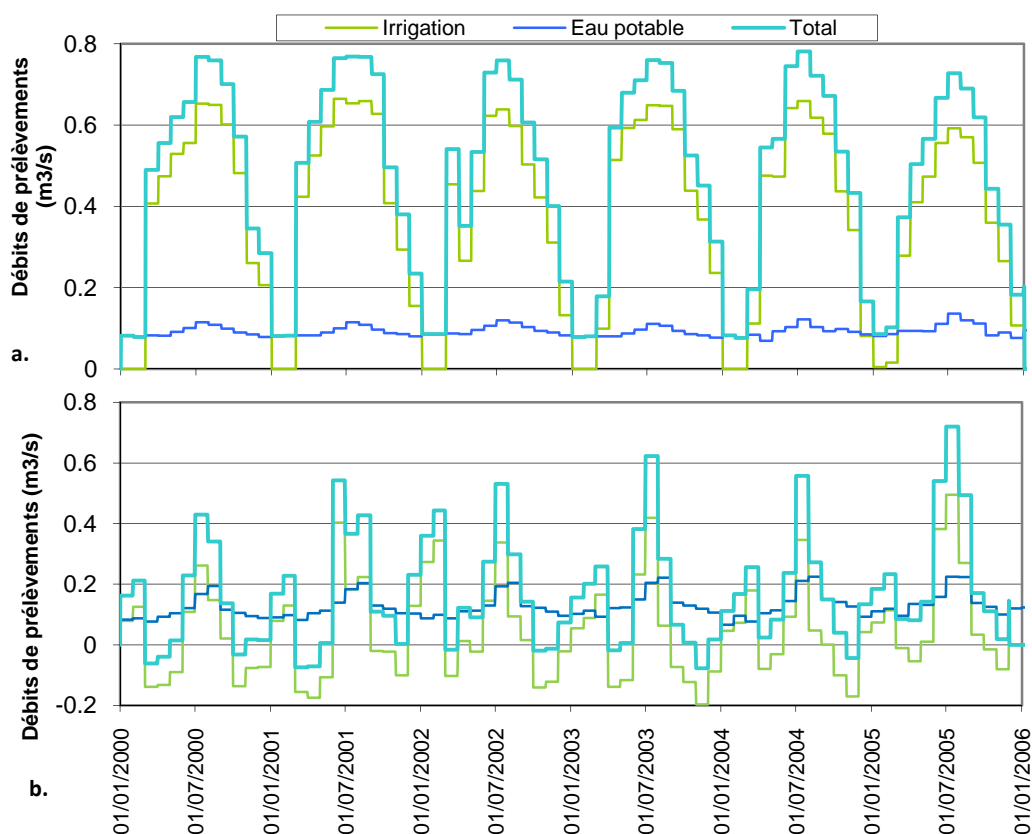


Figure 11 : Résultats de l'estimation rétrospective des débits de prélèvements pour l'alimentation en eau potable (bleu), pour l'irrigation (vert), et totaux (turquoise, gras), pour les sous bassins versant de Reynès (a.) et Argelès (b.)

Les prélèvements sont concentrés sur la période estivale. Les volumes prélevés pour l'usage eau potable sont plus importants sur le sous-bassin versant aval (de l'ordre de 0.2 m³/s en été et 0.1 m³/s en hiver) qu'en amont (~0.1 m³/s, et variations inter-saisonnières peu marquées). La population, beaucoup plus dense en aval du bassin versant, ainsi que la forte fréquentation touristique estivale de cette zone, expliquent cette répartition des prélèvements pour l'alimentation en eau potable.

Concernant les prélèvements pour l'irrigation, ils sont concentrés sur la période estivale, pour les deux sous bassins versants. Les prélèvements nets pour l'irrigation sont bien plus importants dans le sous-bassin amont qu'en aval, avec des pics estivaux de l'ordre de 0.75 m³/s en amont, et de 0,55 m³/s en aval, bien que la surface irriguée soit plus importante en aval. L'irrigation des surfaces agricoles est assurée par des canaux qui prennent de l'eau en amont, et dont une partie est utilisée par les couverts végétaux, le reste réalimentant le cours d'eau (constituant ce que l'on appelle des « retours »), soit au niveau de la partie amont du sous bassin versant, soit en sa zone aval. La différence de prélèvements nets entre les deux sous-bassins versant s'explique donc par la présence des canaux et des retours plus importants dans la zone aval (Figure 10), qui conduit même à des débits de prélèvements nets négatifs en période hivernale. Il est important de noter l'incertitude associée à l'estimation de ces prélèvements, notamment inhérente à l'incertitude existant sur les calculs des taux de retours.

Les volumes mis en jeu par l'usage agricole étant bien plus élevés que ceux de l'usage eau potable, les débits de prélèvements totaux sont en moyenne plus importants au niveau du sous bassin versant amont (de 0.1 à 0.8 m³/s) qu'en aval (de -0.1 à 0.6 m³/s)

La détermination des prélèvements dans les deux sous bassins versant du Tech permet de calculer, à partir des débits mesurés, des débits naturalisés aux deux stations. Ces débits correspondent aux débits que l'on aurait dans le cours d'eau en l'absence d'effets anthropogènes ou sans régulation de débit :

$$Q_{\text{naturalisé}} = Q_{\text{observé}} + Q_{\text{prélèvements}}$$

Les prélèvements sont amenés à évoluer de manière notable dans la zone étudiée, dans le futur. Une estimation de ces évolutions a également été réalisée (§4.1).

2.2. DEMARCHE DE MODELISATION HYDROLOGIQUE

2.2.1. Eléments de méthodologie

La première phase indispensable à la modélisation hydrologique est la phase de calage. Celle-ci a pour but de définir le modèle à construire et de faire coïncider au mieux les chroniques de variables simulées avec les chroniques de variables observées, prises comme référence. Cela permet de définir les valeurs des paramètres propres à la zone étudiée, caractérisant au mieux le fonctionnement hydrologique du bassin versant étudié. Dans cette étude, les modélisations ont été réalisées en utilisant les débits naturalisés du Tech. Cela permet dans une phase ultérieure de pouvoir étudier d'une part l'effet du climat et d'autre part l'effet des prélèvements, sur le fonctionnement de l'hydrosystème.

Ensuite, il est nécessaire de mener une phase de validation, qui consiste à comparer le résultat du modèle à des mesures effectuées sur des périodes différentes de celles utilisées pour le calage. L'ensemble de ce travail a été réalisé pour Reynès et Argelès dans le cadre de ce stage, avec Tempo, et est présenté dans cette partie.

Ainsi, les modèles validés sur le temps présent à l'aide de Tempo permettront par la suite de reproduire les débits futurs à partir de scénarios climatiques futurs construits dans le cadre du projet, en tenant compte des paramètres internes aux modèles, définis lors de la période de calage (§3).

Afin de réaliser le calage, et de mettre en place la méthodologie de modélisation, nous avons décidé dans un premier temps de tester plusieurs techniques de modélisation de type pluie-débit, sur le bassin versant de Reynès. Nous avons donc utilisé deux logiciels de modélisation hydrologique différents : Vensim, et Tempo. Alors que Tempo permet la mise en œuvre d'une modélisation inverse par analyse de signal (§ 2.1.1), Vensim peut être utilisé pour construire des modèles en utilisant des réservoirs de stockage/vidange reliés entre eux par des fonctions de routage. Ces deux approches présentent des avantages différents. Nous nous sommes attelés à optimiser les modélisations par ces deux méthodes dans un premier temps, puis à estimer et comparer la validité des résultats obtenus par chacune d'entre elles. A l'issue de cette phase préliminaire, il s'est avéré que les modélisations conduites à l'aide du logiciel Tempo produisaient des résultats plus satisfaisants que celles construites sous Vensim. Nous avons donc par la suite conduit la totalité de la démarche de modélisation à l'aide du logiciel Tempo.

Toutes les modélisations ont été effectuées au pas de temps trijournalier. En effet, la différence de débits entre les périodes d'étiages et de crues étant très marquée, il était difficile de reproduire ces chroniques au pas de temps journalier avec Tempo. Le choix du pas de temps de 3 jours s'est avéré plus adéquat.

Dans la suite de ce rapport, nous qualifions de « simulées » les chroniques issues de nos modélisations, et d'« observées » celles issues des mesures faites aux stations, extraites de la banque Hydro. Pour les besoins de comparaison entre les chroniques simulées et observées, les critères statistiques complémentaires présentés dans la section suivante (§2.2.2) ont été utilisés.

2.2.2. Indicateurs statistiques utilisés pour déterminer la qualité du calage des modèles sur le temps présent

Afin de déterminer le meilleur ajustement des chroniques issues des modélisations aux chroniques issues des mesures, lors de la phase de calage, différents indicateurs statistiques complémentaires ont été étudiés :

- **Critère de Nash** (Nash & Sutcliffe, 1970) : Ce critère est fréquemment utilisé en hydrologie afin d'exprimer la corrélation entre les valeurs observées et les valeurs simulées.

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Qobs\ i - Qsim\ i)^2}{\sum_{i=1}^n (Qobs\ i - moyenne(Qobs\ i))^2}$$

Ce critère est compris entre -∞ et 1. L'ajustement du modèle aux observations est d'autant meilleur que le critère de Nash est proche de 1.

- **RVE** (Relative Volume Error) (Booij, 2005) : Ce second critère utilisé a pour but de représenter la différence de volume d'eau écoulé sur la période étudiée, entre la chronique simulée et celle issue des observations. L'ajustement du modèle est d'autant meilleur que le RVE est proche de 0.

$$RVE = 100 * \frac{\sum_{i=1}^n (Qsim\ i - Qobs\ i)}{\sum_{i=1}^n (Qobs\ i)}$$

- **RMSE** (Root Mean Square Error) (Cras & al., 2007) : Racine de l'erreur quadratique moyenne. Correspond à la racine carrée de la moyenne arithmétique des carrés des écarts entre les valeurs observées et simulées. Etant donné que des carrés sont calculés, l'importance des erreurs importantes est majorée.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (Qobs\ i - Qsim\ i)^2}$$

L'ajustement du modèle aux observations est d'autant meilleur que le RVE est proche de 0.

Ce critère est compris entre 0 et +∞. L'ajustement du modèle aux observations est d'autant meilleur que le RMSE est proche de 0.

- **Coefficient de corrélation** (linéaire) (Caballero & al., 2007) : correspond au rapport de la covariance par le produit des écarts-types de deux distributions (celle simulée, et celle issue des observations). Permet de mesurer la « qualité » de la régression linéaire simple.

$$rp = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \cdot \sigma_y} = \frac{\sum_{i=1}^n (Qsim\ i - moyenne(Qsim\ i)) \cdot (Qobs\ i - moyenne(Qobs\ i))}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Qsim\ i - moyenne(Qsim\ i))^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (Qobs\ i - moyenne(Qobs\ i))^2}}$$

Ce critère est un nombre sans dimension, compris entre -1 et 1. L'ajustement du modèle aux observations est d'autant meilleur que le coefficient de corrélation est proche de 1.

2.3. MODELISATION DES DEBITS DANS LE SOUS BASSIN VERSANT DE REYNES

2.3.1. Calage du modèle

Le calage du modèle, construit avec Tempo, a été réalisé sur la période 2000-2004 en utilisant les débits naturalisés à Reynès. Cette période a été choisie car elle correspond à la période sur laquelle l'estimation mensuelle des prélèvements liés à l'irrigation et à l'approvisionnement en eau potable, permettant la naturalisation des débits, a été réalisée (§2.1.2.4).

La démarche de modélisation adoptée est relativement classique. Elle vise à mettre en relation la pluie efficace en entrée et le débit naturalisé à Reynès en sortie. La pluie efficace est calculée avec Tempo à partir de la chronique de précipitations (définie selon la méthode présentée au §2.1.2.3) et celle d'ETP (lissée par un filtre de moyenne mobile centrée sur 30 jours). Une contribution d'un signal particulier lié à un débit de fonte de neige est ajoutée à la relation Pluie efficace->Débit (Figure 12). En effet, une information spécifique est portée par le signal de cette fonte, qui produit un débit décalé dans le temps par rapport aux précipitations neigeuses. Le pourcentage de contribution de ce signal au débit de la rivière a été défini comme étant du même ordre de grandeur que le pourcentage représenté par la hauteur de neige annuelle par rapport à la hauteur de pluie annuelle sur cette partie du bassin versant (15 %).

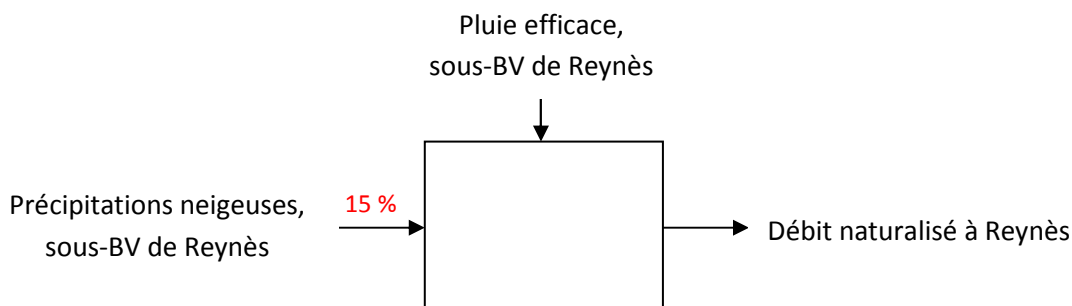


Figure 12 : Représentation schématique de la méthode permettant de modéliser le débit naturalisé à la station de Reynès, sur le Tech. Le modèle est calé sur le temps présent, du 02/09/2000 au 02/10/2004, au pas de temps 3 jours. Ce modèle considère que la neige contribue pour 15 % au signal de débit et que la contribution moyenne de la pluie efficace est de 54.2 % de la précipitation totale annuelle sur le bassin. Il considère une composante lente de 360 jours et une composante rapide de 3 jours.

La pluie efficace, la neige et le débit sont associés au moyen d'un modèle de transfert, qui permet de reproduire correctement les débits naturalisés à la station de Reynès sur la période 2000-2004. Les résultats du calage sont présentés ci-dessous, dans la Figure 13.

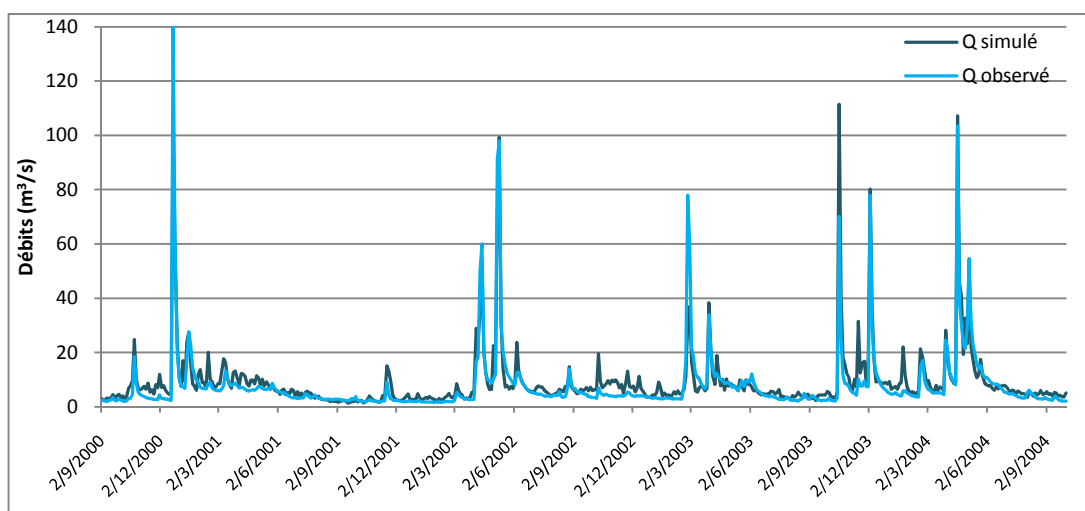


Figure 13 : Résultat du calage du modèle reproduisant le débit naturalisé à la station de Reynès.

Tableau 1 : Résultats statistiques de l'adéquation du débit simulé à celui observé à Reynès, sur la période de calage.

| Nash | RVE | RMSE | Coefficient de corrélation |
|--------------|---------------|--------------|----------------------------|
| 0.853 | 15.117 | 4.957 | 0.928 |

Les résultats de calage du modèle pour le sous bassin versant amont du Tech sont considérés comme très satisfaisants. L'adéquation entre les débits naturalisés simulés et ceux observés sur la période 2000-2004 est bonne, tant au vu des critères statistiques calculés (Tableau 1) que visuellement (Figure 13). Il est important de vérifier que les périodes d'étiages sont bien représentées par le modèle mis en place. En

effet, ces périodes, les plus critiques au regard du bilan besoins/ressources en eau, ont un intérêt particulier étant donné les problématiques étudiées dans ce projet.

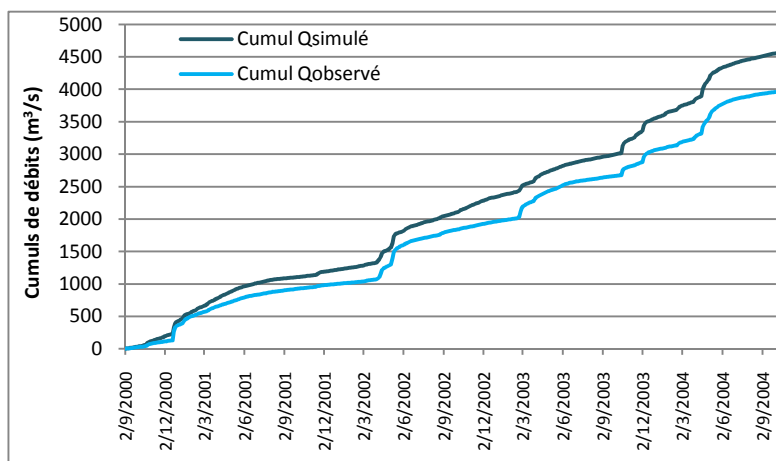


Figure 14 : Cumuls de débits naturalisés à Reynès simulés, et de ceux observés, sur la période de calage du modèle.

Une autre manière de qualifier la qualité de la simulation obtenue par calage consiste à comparer les cumuls de débits simulés et observés. La Figure 14 présente cette comparaison, qui montre que les débits simulés par le modèle ont tendance à être surestimés par rapport aux débits observés. Ceci est également illustré par le critère statistique RVE, qui montre une erreur volumique positive de l'ordre de 15% (Tableau 1). Dans le détail, des décalages semblent apparaître entre les deux courbes (Figure 15). Si la qualité du modèle peut être questionnée pour expliquer ces décalages, il est important de considérer également la fiabilité des mesures de débits, qui peut expliquer une partie de ces différences.

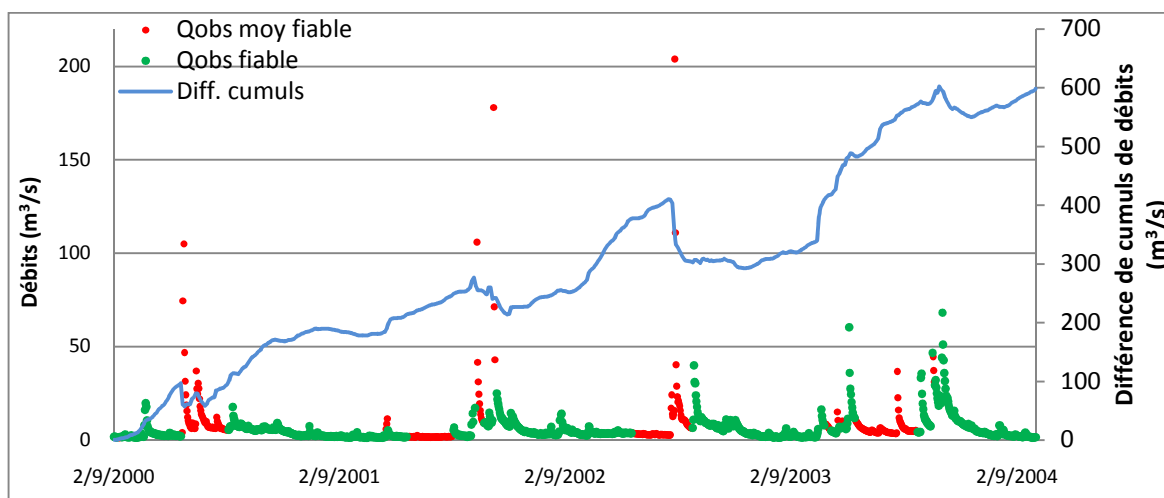


Figure 15 : Débit naturalisé observé à la station de Reynès. Les portions en rouge représentent les valeurs dont la fiabilité est estimée moyenne (code 5), tandis que celles en vert représentent les mesures dont la fiabilité est estimée bonne (selon les données de la banque Hydro). La courbe bleue représente la différence entre les cumuls de débits simulés et observés.

A la station de Reynès, environ 62% des valeurs de débits mesurées sont considérées comme fiables par la banque Hydro, contre 38% répertoriées comme moyennement fiables, sur la période 2000-2004. La fiabilité de la majeure partie des débits mesurés en moyennes et hautes eaux est qualifiée comme moyenne. La Figure 15 montre qu'il existe une certaine concordance entre les périodes où l'écart entre les cumuls de débits simulés et observés augmente sensiblement et les périodes où la fiabilité des données mesurées est moyenne. L'écart entre les débits cumulés de la Figure 14 s'explique donc probablement en partie par la fiabilité moyenne des observations, notamment en période de moyennes et hautes eaux.

2.3.2. Validation du modèle

Une fois le modèle calé sur la période 2000-2004, il est nécessaire de le valider sur une période différente. Etant donné que nous ne disposons pas d'estimations de prélèvements en dehors de cette période de calage, et donc de possibilité de naturaliser les débits, nous ne pouvons pas véritablement valider au sens strict le modèle sur une autre période, (puisque le modèle permet de reproduire des débits naturalisés). Nous avons tout de même réalisé une simulation sur la période 1990-2000, pour comparer les résultats obtenus aux débits observés (Figure 16). Ainsi, même si nous comparons des débits naturalisés à des débits influencés par les prélèvements, nous pouvons tout de même tester la qualité de la simulation et valider ainsi indirectement le modèle utilisé pour décrire le système étudié.

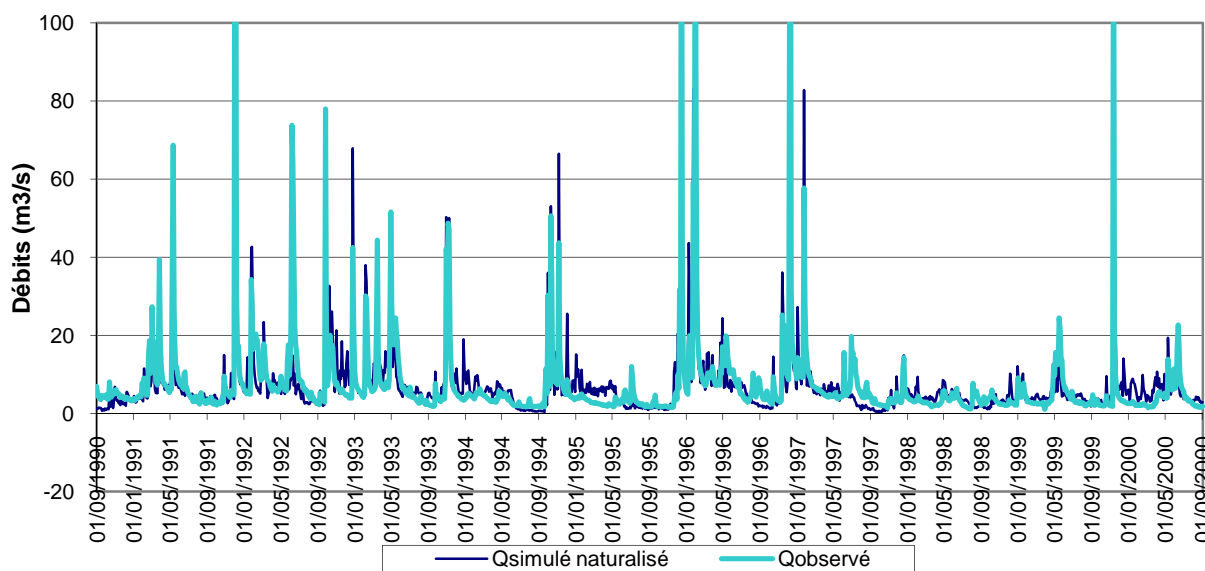


Figure 16 : Comparaison des résultats de simulations de débits naturalisés à la station de Reynès et des débits observés, sur la période de validation : 1990-2000.

Tableau 2 : Résultats statistiques de l'adéquation du débit simulé à Reynès à celui observé, sur la période de validation

| Nash | RVE | RMSE | Coefficient corrélation |
|-------|-------|-------|-------------------------|
| 0.807 | 0.633 | 5.976 | 0.898 |

Les critères statistiques calculés sur la période du 01/09/1990 au 02/09/2000 (Tableau 2) montrent que le modèle reproduit relativement fidèlement les débits observés entre 1990 et 2000, bien qu'il ait été calé sur les débits naturels.

Comparé au calage, le critère RVE obtenu est paradoxalement meilleur (plus proche de 0). Ceci est curieux, dans la mesure où les débits observés sur la période 1990-2000 sont censés être plus faibles que ceux de la période 2000-2005. Notre modèle devrait donc présenter une valeur pour le critère RVE calculé sur la période 1990-2000 supérieure à celle obtenue pour la période de calage. Pour tenter de comprendre ce paradoxe, nous avons examiné la courbe des débits observés cumulés sur la période 1971-2004 (Figure 17). Cette analyse nous a permis de constater l'occurrence d'une rupture de pente sur la courbe, visible à partir de l'année 1999-2000. Nous ne possédons pas d'explication de cette rupture (l'influence d'un nouveau poste de prélèvement, la modification de la station hydrométrique, le changement de repère de mesure... sont autant d'hypothèses qui pourraient être à l'origine de cette modification notable dans les débits observés). Son existence implique cependant que les débits observés avant les années 1999-2000 sont globalement supérieurs à ceux observés après cette année marquant la rupture. Cela explique donc que les débits simulés par notre modèle soient plus proches (en valeur volumique cumulée – RVE) des débits observés.

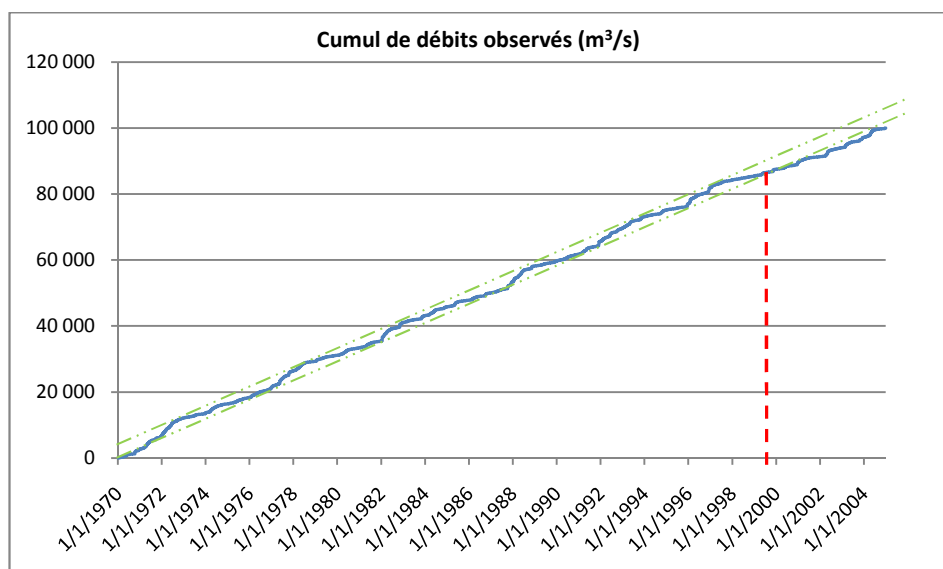


Figure 17 : Graphique représentant le cumul des débits observés à la station de Reynès, à partir des données issues de la banque Hydro, de 1970 à 2004.

La sous-estimation apparaît de manière plus flagrante si nous comparons le débit simulé, au débit observé sur la période passée (1990-2000), artificiellement naturalisé en y ajoutant les débits moyens mensuels de prélèvements estimés par BRLi sur la période 2000-2005. Les résultats des critères statistiques obtenus sont présentés dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Résultats statistiques de l'adéquation du débit simulé au débit observé corrigé des débits de prélèvements moyens sur la période de validation (1990-2000)

| Nash | RVE | RMSE | Coefficient corrélation |
|-------|--------|-------|-------------------------|
| 0.803 | -5.738 | 6.040 | 0.896 |

Les résultats obtenus sont donc similaires à ceux obtenus dans notre première comparaison aux débits observés (Tableau 2). Si les autres critères gardent des valeurs similaires, nous voyons que le RVE devient négatif, ce qui est logique puisque la naturalisation augmente la valeur des débits observés.

Dans la mesure où la rupture permet d'expliquer les valeurs de RVE obtenues, nous considérons que le modèle est validé de manière satisfaisante, au vu des valeurs obtenues pour les autres critères. Nous pouvons donc l'utiliser pour simuler l'impact du climat futur sur les débits.

2.3.3. Analyse des incertitudes associées au modèle utilisé

Pour étudier les incertitudes associées au fait de choisir un certain type de modèle hydrologique, nous avons comparé les résultats obtenus par la modélisation Tempo sur le bassin versant de Reynès à ceux résultant des modélisations effectuées par BRLi à l'aide du modèle GR2M (développé par le Cemagref). Alors que Tempo effectue une modélisation inverse par analyse de signal, GR2M permet de construire de manière simple et rapide des modèles utilisant des réservoirs reliés par des fonctions de routage, au pas de temps mensuel. La Figure 18 présente les résultats des simulations réalisées à l'aide de ces deux modèles, au pas de temps mensuel.

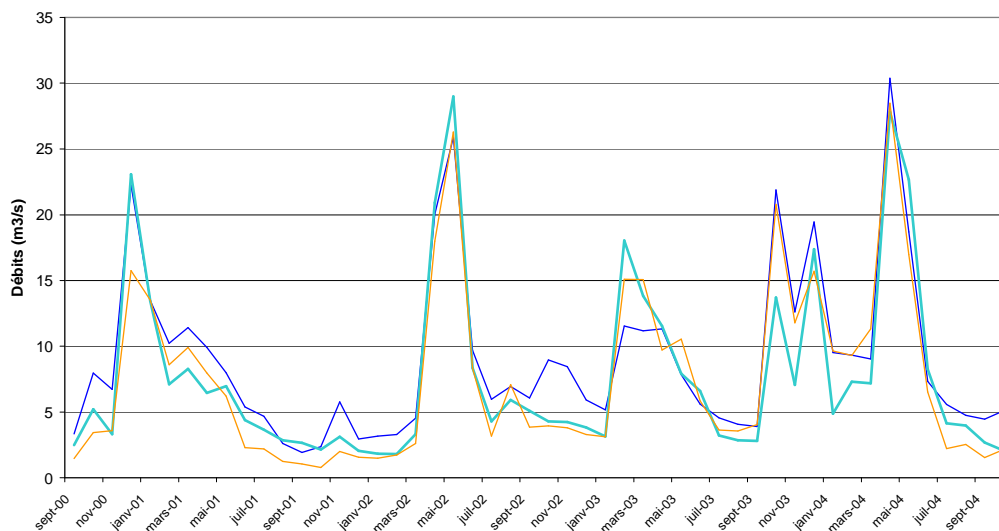


Figure 18 : Comparaison des résultats de simulations de débits naturalisés à Reynès, obtenus par Tempo et par GR2M, et du débit observé, sur la période de calage (2000-2004). En bleu: Qsimulé Tempo ; Orange: Qsimulé GR2M ; Turquoise: Qobservé.

Tableau 4 : Résultats statistiques des adéquations des débits simulés à l'aide des modèles Tempo et GR2M, et du débit mesuré, mensualisés, sur la période de calage (2000-2004).

| | Nash | RVE | RMSE | Coefficient de Corrélation |
|--------------|--------------|---------------|--------------|----------------------------|
| TEMPO | 0.849 | 15.941 | 2.671 | 0.939 |
| GR2M | 0.878 | -3.694 | 2.395 | 0.938 |

Cette comparaison des résultats issus de modèles différents, dans le cas de Reynès, permet de noter en premier lieu que les adéquations qu'ils obtiennent des résultats équivalents, en termes de qualité. Au regard des critères statistiques étudiés (Tableau 4), les résultats sont très proches, à l'exception du RVE (Relative Volume Error), qui est positif et plus marqué pour le modèle Tempo, alors qu'il est négatif pour le modèle GR2M.

Cette comparaison permet d'évaluer la variabilité entre les débits simulés, selon la démarche de modélisation adoptée. Une observation de l'écart entre les deux courbes de débits simulés permet ici de rendre compte de l'importance de cette variabilité, et ce notamment en périodes d'étiages (particulièrement intéressantes dans notre étude) : les écarts peuvent ainsi être de l'ordre de $1 \text{ m}^3/\text{s}$. Une incertitude importante est donc liée au choix de la méthode de modélisation choisie.

2.4. MODELISATION DES DEBITS DANS LE SOUS BASSIN VERSANT D'ARGELES

2.4.1. Conceptualisation du modèle

La modélisation du débit à la station d'Argelès est plus complexe que dans la partie amont. En effet, sur la partie aval du sous-bassin versant du Tech, le cours d'eau coule au sein d'alluvions récentes, qui contiennent une nappe alluviale. Des relations hydrauliques entre nappe et rivière sont très probables. En effet, lorsque l'on compare les débits observés à la station d'Argelès à ceux observés à la station de Reynès, il apparaît que les premiers sont inférieurs aux seconds, et ce notamment en période estivale. La Figure 19 présente la chronique de la différence entre le débit observé à Reynès et celui à Argelès : celle-ci présente en effet des pics centrés sur les étiages.

Le manque de connaissances et d'observations sur la nappe alluviale du Tech ne permet pas la mise en œuvre d'une modélisation basée sur sa géométrie et ses caractéristiques hydrodynamiques. Par

conséquent, les techniques de la modélisation inverse et de traitement de signal ont été utilisées pour tenter de décrire le comportement du cours d'eau et de la nappe sur ce bassin versant.

Pour ce faire, outre les données météorologiques et les données de débit à la station d'Argelès, l'évolution du niveau piézométrique mesuré dans la nappe alluviale à la station Ortaffa, située non loin en amont d'Argelès, est intégrée à l'analyse.

En observant l'évolution de niveau piézométrique à Ortaffa (Figure 19), on constate que le tarissement de la nappe au cours de l'étiage présente un point d'inflexion. En effet, alors que le début du tarissement semble suivre un tarissement^(*) classique théoriquement défini par une loi de Maillet^(*) (Lang & Gille, 2006), une rupture de pente apparaît à un niveau situé autour de 24 mètres NGF. En dessous de ce seuil, la pente de tarissement s'accroît sensiblement, en début de période estivale. Afin de vérifier cette observation, nous avons mené une analyse des hauteurs classées sur les données de niveau piézométrique observées à Ortaffa. Cette analyse a permis de vérifier qu'un point d'inflexion situé autour de 24 mètres marque une rupture de pente sur le graphique des hauteurs classées (Annexe 4). Ce point d'inflexion traduit une modification probable du comportement hydrodynamique du système. Ainsi, la nappe alluviale quaternaire du Tech a la particularité de se comporter selon deux régimes distincts en période d'étiage.

Dans le but de comprendre l'origine de la modification du comportement hydrodynamique du système repérée grâce au niveau piézométrique à Ortaffa, nous avons comparé ce dernier à la différence de débit observée entre les stations de Reynès et d'Argelès (Figure 19).

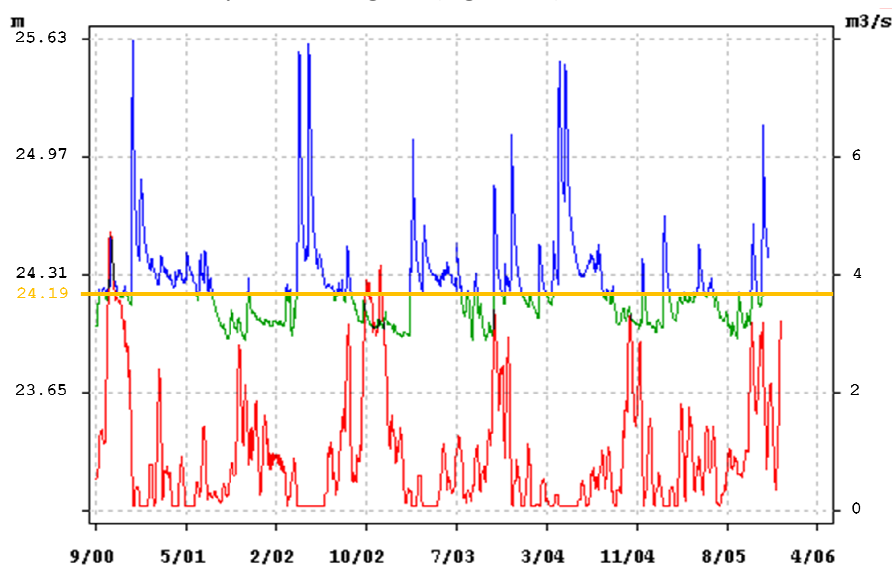


Figure 19 : Graphique représentant d'une part le niveau piézométrique mesuré à Ortaffa, de part et d'autre du seuil défini à 24,19 m (orange), et d'autre part, la différence de débit ΔQ entre le débit observé à Argelès et celui observé à Reynès (rouge)

La Figure 19 permet de remarquer une concordance entre le changement de pente de tarissement et les pics de la fonction $\Delta Q = Q_{\text{Reynès}} - Q_{\text{Argelès}}$ (correspondant à une augmentation plus marquée en étiage de la différence entre le débit mesuré à Reynès et celui mesuré à Argelès). L'allure de la fonction ΔQ et sa concordance avec le changement de pente du tarissement s'expliquent probablement par des prélèvements effectués en aval de Reynès, qui n'auraient pas été considérés dans l'étape de naturalisation des débits. Ces prélèvements sont probablement majoritairement effectués dans la nappe alluviale, puisqu'ils se traduisent par une rupture de pente du tarissement de la nappe en étiage. Une autre hypothèse qui pourrait être invoquée concerne la méthode d'estimation des prélèvements et surtout de leur retour au milieu, élaborée par BRLi. En effet, les taux de retour et le choix de la destination de la part des prélèvements qui retournent dans le milieu ont été définis à dire d'experts. Ils pourraient

donc potentiellement être à l'origine d'une surestimation des retours dans le sous bassin versant de Reynès, et ainsi, d'une sous-estimation des retours dans le sous bassin versant d'Argelès (Figure 10). Cette deuxième hypothèse est cependant peu probable, dans la mesure où nous avons mis en évidence le fait que le ΔQ observé (qui n'intègre pas les estimations de prélèvements faites par BRLi), présente le même type de chronique que le ΔQ naturalisé. Nous avons donc privilégié la première hypothèse et recherché l'origine des prélèvements dont la prise en compte aurait été omise. Le volume annuel moyen de ces prélèvements serait, selon notre analyse, de l'ordre de 13 millions de m^3 par an (volume annuel moyen de ΔQ).

L'analyse de la carte géologique montre que les formations alluviales situées au Nord d'Elne, dans le secteur de St Cyprien, pourraient être en contact hydraulique avec la nappe alluviale du Tech. Le contact se fait au travers d'un bras mort du Tech, se détachant du lit actuel du cours d'eau quelques kilomètres en amont de la station d'Argelès, en passant à l'Ouest des formations Pliocène que l'on observe entre Elne et St Cyprien (Figure 20). Sur le parcours de ce bras mort du Tech, deux importants captages pour l'alimentation en eau potable ont notamment été identifiés (Mas Aragon, et Saint Cyprien) (Figure 20). Le captage de Mas Aragon avait été pris en compte pour naturaliser les débits à la station d'Argelès. En revanche, celui de Saint Cyprien n'avait initialement pas été identifié comme pouvant impacter ce cours d'eau, puisque situé en aval de la station d'Argelès. Une partie des prélèvements que nous recherchons concerne donc le captage d'eau potable de la commune de Saint Cyprien. Cependant, les prélèvements annuels pour ce captage sont estimés à 1,5 millions de m^3 , ce qui représente environ 10% du volume annuel de ΔQ estimé. Il existe donc probablement d'autres prélèvements non pris en compte, dont l'origine reste à déterminer.

La Figure 20 montre la présence d'autres points de prélèvements situés en aval de la station d'Argelès, qui n'ont pas non plus été pris en compte dans l'estimation des prélèvements faite par BRLi. Cependant, les volumes prélevés à ces stations sont relativement faibles. A l'instar du captage de Saint Cyprien, leur omission dans les estimations de prélèvements ne suffirait pas à expliquer les 10 millions de m^3 manquants mis en évidence par le ΔQ .

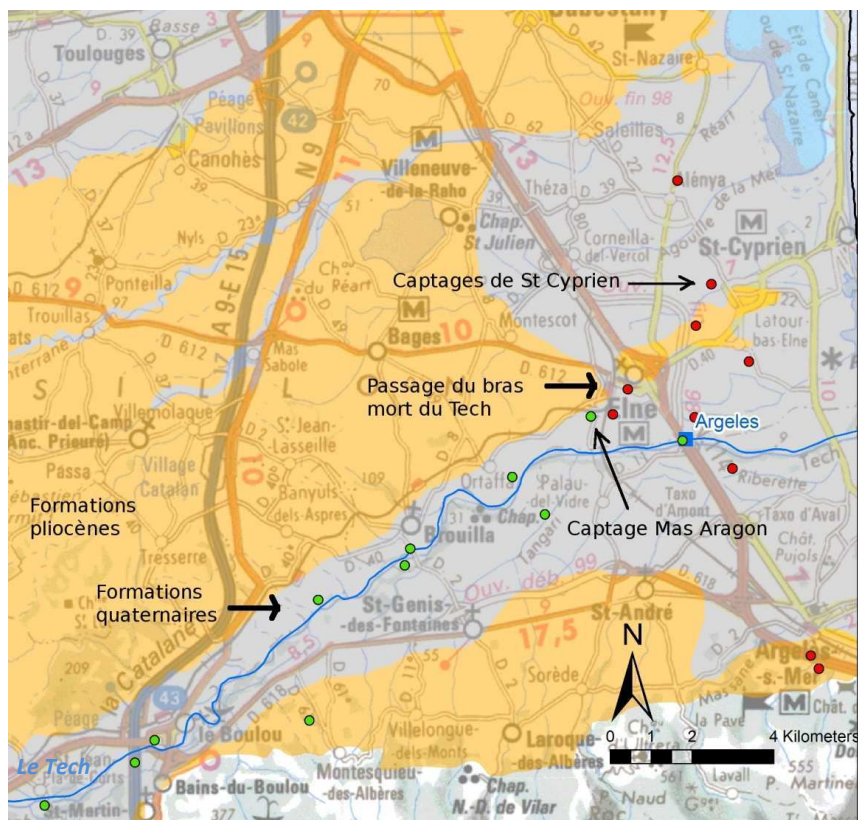


Figure 20 : Identification des points de captage pour l'alimentation en eau potable pris en compte dans les calculs de prélèvements pour le sous bassin versant d'Argelès (vert), et non pris en compte (rouge). La station d'Argelès est repérée par un carré bleu représenté sur le cours d'eau.

Appuyés par les dires d’expert (MARCHAL J.P., BRGM), nous avons alors considéré que les prélèvements manquants étaient probablement d’origine agricole. En effet, le sous bassin versant aval, et notamment la zone de formations quaternaires où débouche le bras mort du Tech (région d’Alenya), se caractérise par la présence de nombreuses exploitations agricoles cultivant sous serre. Sur ces exploitations, une surface importante est allouée à des cultures maraîchères, particulièrement demandeuses en eau, dont les prélèvements n’ont pas été quantifiés dans le cadre du projet VULCAIN. Il existerait ainsi de nombreux forages agricoles non recensés dans cette zone, représentant un potentiel d’exploitation des eaux souterraines circulant dans les formations alluviales non négligeable. La coïncidence entre la forme du pic de ΔQ et la période estivale nous conforte dans l’hypothèse d’une origine agricole de ces prélèvements, les besoins en eau des cultures étant particulièrement marqués en période estivale.

La mise en évidence de ces prélèvements supplémentaires nous a conduit à reconsidérer notre démarche de modélisation. Une démarche de « renaturalisation » des débits à la station d’Argelès a été conduite sur la période de calage de la méthode de transfert, pour ensuite recalculer un modèle sur une nouvelle chronique de débits renaturalisés à la station d’Argelès.

Pour effectuer la renaturalisation des débits, nous avons élaboré, grâce aux fonctionnalités de Tempo, une démarche de modélisation en cascade constituée de trois grandes étapes :

1. Création d’un lien entre la valeur du ΔQ et le niveau piézométrique à Ortaffa, pour garder la cohérence entre la rupture de pente et l’augmentation du ΔQ .
2. Mise en relation de la pluie efficace, du niveau piézométrique à Ortaffa et du débit issu de la station en amont, avec le débit naturalisé (selon les prélèvements estimés par BRLi) à la station d’Argelès.
3. Utilisation de cette relation pour renaturaliser le débit à la station d’Argelès, en annulant l’effet de la relation entre le ΔQ et le niveau piézométrique, lorsque ce dernier passe sous le seuil de changement de régime (24.19 mètres).

Les détails du déroulement des différentes étapes de modélisation nous ayant conduit à reproduire un débit renaturalisé à la station d’Argelès sont présentés en Annexe 5.

Cette méthode, bien que complexe, présente l’avantage de renaturaliser les débits à la station d’Argelès en gardant une cohérence avec le fonctionnement de la nappe, ce que ne permettrait pas une renaturalisation « arithmétique », utilisant une valeur moyenne journalière du ΔQ , par exemple.

Une fois les débits à la station d’Argelès renaturalisés, nous avons recalculé notre modèle en créant une méthode de transfert permettant de reproduire le débit « renaturalisé » à Argelès, à partir de la pluie efficace dans le sous-bassin versant d’Argelès, et du débit naturalisé à Reynès (Figure 21).

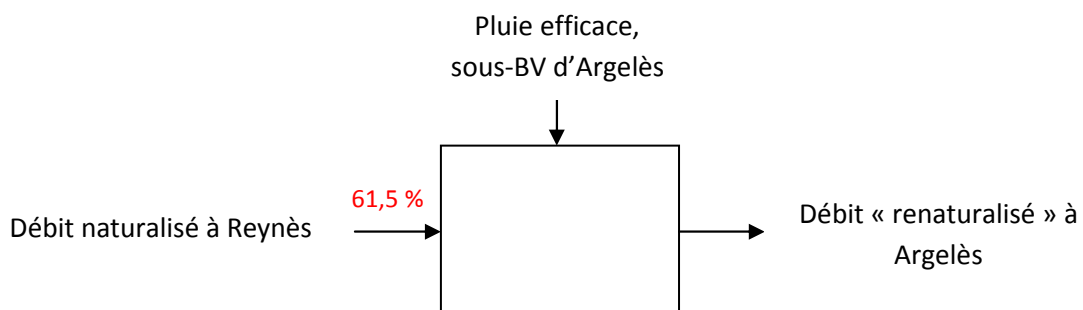


Figure 21 : Représentation schématique de la méthode permettant de modéliser le débit renaturalisé à la station d’Argelès, sur le Tech. La contribution du signal du débit naturalisé à Reynès au signal sortant a été calée à 61,5%, valeur proche du rapport entre la surface de ce sous bassin versant amont et celle du bassin versant entier.

2.4.2. Résultat du calage du modèle

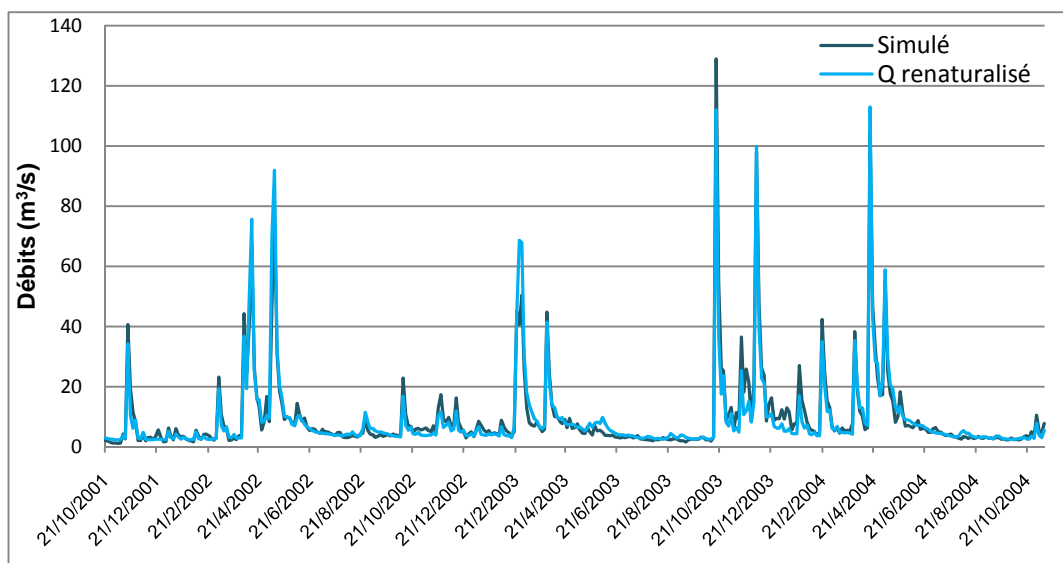


Figure 22 : Résultat de calage du modèle sur les débits renaturalisés à la station d'Argelès.

Tableau 5 : Résultats statistiques traduisant l'adéquation des débits simulés et des débits observés renaturalisés à Argelès.

| Nash | RVE | RMSE | Coefficient de corrélation |
|-------|-------|-------|----------------------------|
| 0.933 | 3.016 | 3.667 | 0.966 |

Le modèle ainsi calé pour le sous bassin versant aval du Tech est très satisfaisant, l'adéquation entre les débits simulés et les débits observés renaturalisés sur cette période étant bonne, tant au vu des critères statistiques calculés (Tableau 5) que visuellement (Figure 22 & Figure 23) (notamment en périodes d'étiages, périodes qui présentent le plus d'intérêt dans le cadre du projet VULCAIN).

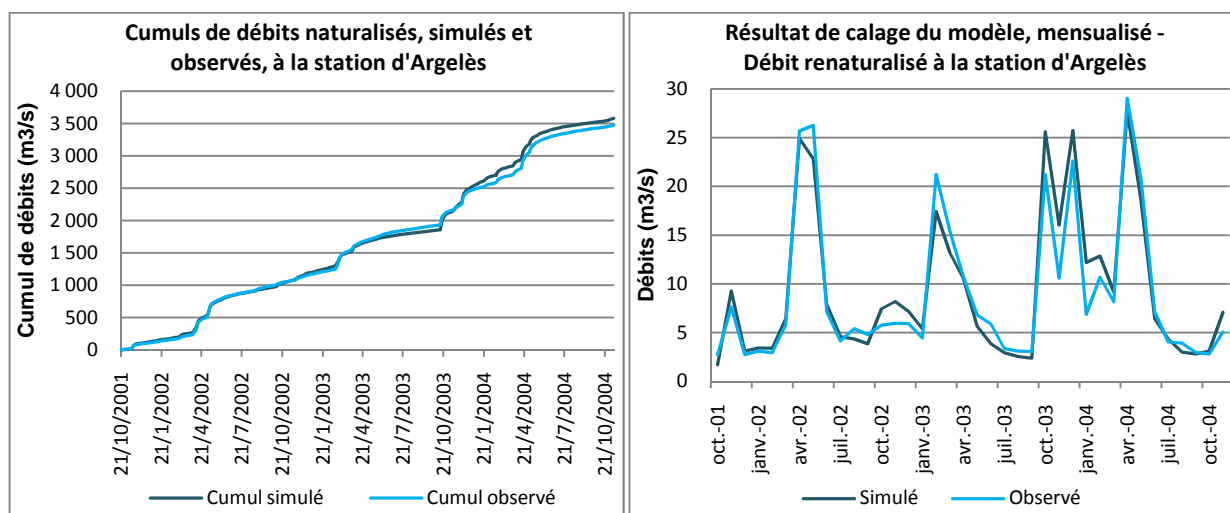


Figure 23 : Résultats du calage du modèle permettant de reproduire les débits renaturalisés à Argelès, cumulés (a.) et mensualisés (b.), sur la période de calage.

En revanche, pour ce sous bassin versant aval, il nous est impossible de valider le modèle sur la période 1990-2000, sur les débits renaturalisés. Il n'est en effet pas possible d'étendre la démarche de renaturalisation du débit à la station d'Argelès à partir du niveau piézométrique, la chronique étant disponible sur une période restreinte.

2.4.3. Validation du modèle

Nous pouvons par contre, de la même manière que pour Reynès, valider indirectement notre modèle en comparant les débits simulés sur la période 1990-2000 aux débits observés à la station d'Argelès.

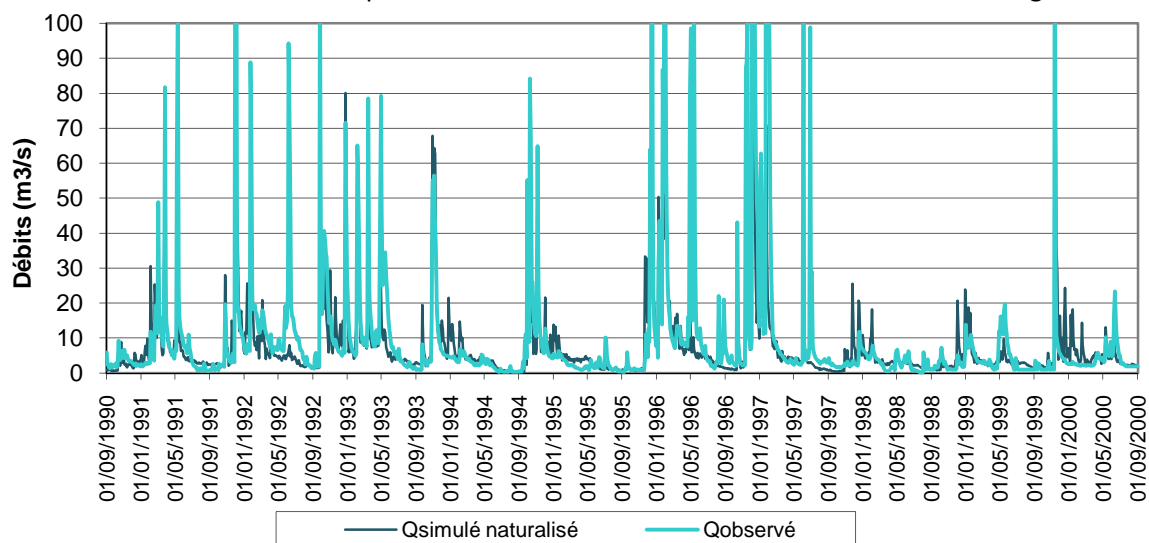


Figure 24 : Comparaison des résultats de simulations de débits naturalisés à la station d'Argelès et des débits observés, sur la période 1990-2000.

Tableau 6 : Résultats statistiques de l'adéquation du débit simulé à celui observé sur la période de validation (1990-2000)

| Nash | RVE | RMSE | Coefficient corrélation |
|-------|---------|--------|-------------------------|
| 0.530 | -25.787 | 18.637 | 0.776 |

Les critères statistiques calculés sur la période du 01/09/1990 au 02/09/2000 (Tableau 6) montrent que le modèle reproduit relativement correctement les débits observés entre 1990 et 2000, bien qu'il ait été calé sur des débits renaturalisés, pour ce sous-bassin versant. La RVE très négative illustre la sous-estimation du débit par le modèle, bien que celui-ci soit calé sur des débits naturels. Cela s'explique de la même façon que pour le sous bassin versant amont. En effet, une rupture de pente dans les cumuls de débits influencés issus de la banque Hydro explique la négativité de ce critère RVE, ici.

Nous considérons que le modèle visant à reproduire le débit renaturalisé à la station d'Argelès est validé de manière satisfaisante. Ce modèle pourra donc être utilisé ultérieurement pour simuler l'impact du climat futur sur les débits à cette station.

Une simulation sur le temps présent (période 1980-2000) peut être réalisée à partir des modèles calés et validés pour les deux sous bassins versant du Tech. Les résultats obtenus permettent de mieux comprendre le fonctionnement de ce sous bassin versant, sur la période actuelle.

2.5. CARACTERISATION DU FONCTIONNEMENT HYDROGEOLOGIQUE DU BASSIN VERSANT DU TECH, AU VU DES SIMULATIONS PRESENTES

La Figure 25, qui présente les moyennes mensuelles des débits spécifiques^(*) dans les sous bassins versant amont et aval du Tech ainsi que le niveau piézométrique mensuel moyen à Ortaffa, nous permet de caractériser le fonctionnement hydrogéologique du bassin versant, sur la période actuelle.

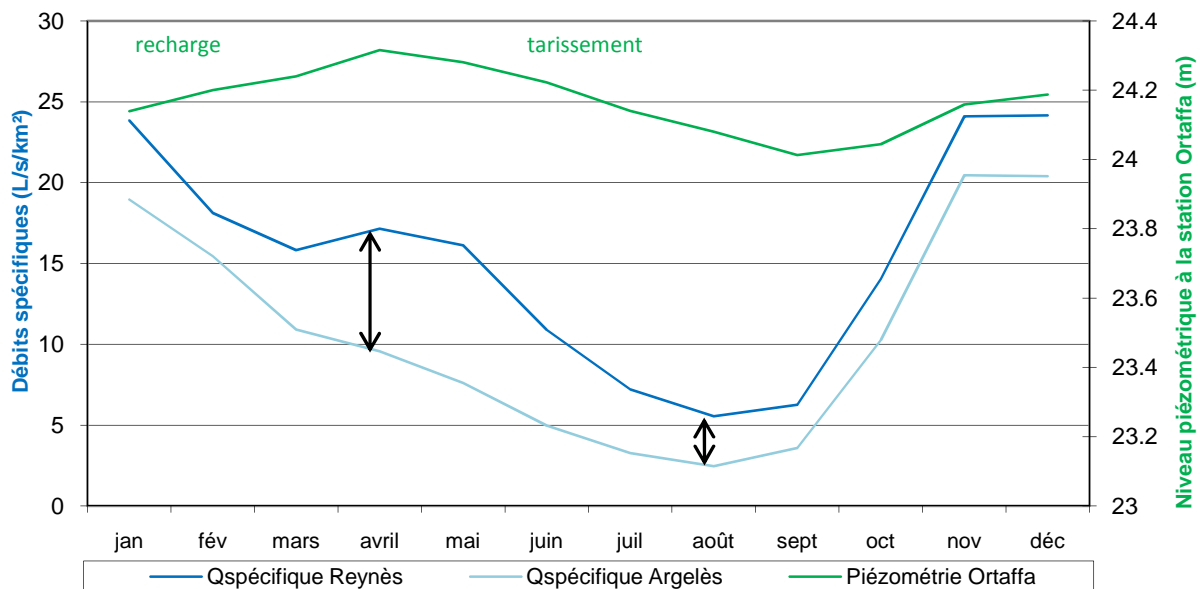


Figure 25 : Moyennes mensuelles des débits spécifiques naturalisés simulés sur la période 1980-2000 aux stations de Reynès et d'Argelès, et du niveau piézométrique à Ortaffa.

La Figure 25 montre en premier lieu que le débit spécifique du Tech est en moyenne nettement inférieur dans le sous bassin versant aval que dans le sous bassin amont, et ce tout au long de l'année. Cette différence représente en moyenne 4.6 L/s/km^2 , soit environ un tiers du débit spécifique moyen enregistré à la station de Reynès. La « productivité » du sous bassin versant de Reynès est ainsi plus importante que celle d'Argelès. En effet, le débit spécifique correspond au débit par unité de superficie de bassin versant. Il est généralement utilisé pour comparer des cours d'eau sur des bassins versants différents ; dans notre cas, il permet de comparer le comportement d'un cours d'eau sur deux sous bassins versants de superficies différentes.

Il semble donc qu'une forte perte de flux ait lieu entre les deux stations de Reynès et d'Argelès. Trois hypothèses pourraient expliquer cette perte de flux :

- La nappe pourrait drainer le cours d'eau toute l'année. Celle-ci étant située exclusivement sous le sous bassin versant aval, cela pourrait expliquer une perte constante enregistrée entre les deux stations de mesure du Tech.
- Il est possible que les prélèvements restent sous-estimés, malgré la renaturalisation des débits opérée.
- L'existence d'un inféroflux^(*) (écoulement par des alluvions perméables sous le lit d'une rivière) dans le sous bassin versant d'Argelès pourrait également expliquer cette perte de flux entre les deux stations.

Par ailleurs, l'écart entre les débits spécifiques mensuels moyens à Reynès et à Argelès s'amointrit entre les mois d'Avril et Août (il passe de 7.6 à 3 L/s/km^2). La productivité du sous bassin versant d'Argelès diminue donc moins que celle de Reynès : ce constat pourrait s'expliquer par un soutien du débit du cours d'eau par la nappe alluviale. Malgré ce probable soutien assuré par la nappe, le débit spécifique estival reste inférieur dans le sous bassin versant de Reynès.

Ce soutien assuré par la nappe est repérable sur la courbe de niveau piézométrique moyen mensuel. En effet, suite à une phase de recharge de la nappe alluviale identifiable de Janvier à Avril, celle-ci alimenterait le cours d'eau à partir du mois de Mai, lors de son tarissement (Figure 25). Notons cependant que nous ne connaissons pas la part liée à l'impact des prélèvements dans ce tarissement de la nappe alluviale.

2.6. DISCUSSION

Une incertitude importante est liée à nos modèles eux-mêmes. En effet, dans toute démarche de modélisation, il est important de rester conscient que le modèle mis en place ne représente qu'une vision de la réalité. Tous les résultats obtenus sont ainsi dépendants des hypothèses émises, et des choix de modélisation opérés.

Dans notre cas, de surcroît, la modélisation effectuée dans le sous bassin versant aval se base sur une hypothèse forte, postulant que la perte de débit que nous avons mise en évidence entre les stations amont et aval est liée à des prélèvements en grande partie d'origine agricole, qui n'auraient pas été pris en compte dans l'estimation des volumes d'eau prélevés pour cet usage. La « renaturalisation » des débits à la station d'Argelès conduite afin de compenser cela a été réalisée de manière à reproduire le plus fidèlement possible la « réalité » ; cependant, les incertitudes liées à celle-ci sont importantes.

La qualité de notre démarche est également grandement dépendante des données d'entrée utilisées pour notre modèle, et notamment des données de prélèvements et des données climatiques. La spatialisation des données climatiques sur la grille SAFRAN pourrait être à l'origine d'incertitudes, ainsi que la méthode de pondération de ces données de la grille SAFRAN élaborée pour créer une unique chronique de chaque variable climatique pour chacun des sous bassins versant. Les données de prélèvements estimées par BRLi sont également source d'incertitudes, comme nous l'avons évoqué. Les calculs de retours dans l'estimation des prélèvements nets à usage agricole pourraient notamment être mis en cause.

Une limite de notre démarche de modélisation réside également dans le fait que nous n'ayons pas pu véritablement valider le modèle, en comparant les débits naturalisés simulés à des débits naturalisés observés sur une période différente de la période de calage.

Le travail de calage des modèles hydrologiques permettant de reproduire les débits naturalisés dans les sous bassins versant amont et aval du Tech, réalisé au cours de ce stage, est une première phase nécessaire au déroulement de notre démarche. L'étape suivante consiste à utiliser ces modèles en introduisant en entrée des chroniques climatiques futures, pour simuler les débits correspondants dans les deux sous bassins versants étudiés, pour ces périodes futures. La comparaison des résultats de ces simulations sur les temps futurs aux résultats des simulations sur le temps présent permet de déterminer l'impact présumé du changement climatique sur le comportement hydrologique du bassin versant étudié.

3. IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE DU TECH

L'étude des impacts du changement climatique sur le fonctionnement hydrologique du bassin versant du Tech nécessite en premier lieu d'avoir des données concernant ces changements climatiques à prévoir dans les années futures, sur la zone d'étude. Cette section présente le travail réalisé au cours de ce stage afin de caractériser ces impacts du changement climatique, qui se base sur ces données météorologiques élaborées par Météo France.

3.1. SCENARIOS CLIMATIQUES FUTURS : METHODE D'OBTENTION ET RESULTATS

3.1.1. Méthode d'obtention des scénarios climatiques futurs

Pour construire ces scénarios de climat, les chercheurs de Météo France se sont appuyé sur une base de données de simulations climatiques globales issues de 21 modèles développés dans le cadre de l'exercice

d'intercomparaison WCRP/CMIP3 (World Climate Research Programme / Coupled Model Intercomparison Project). Ces simulations ont été analysées par le GIEC (Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat) pour son quatrième rapport d'évaluation paru en 2007. Certaines d'entre elles représentent le climat préindustriel, non perturbé par les activités anthropiques émettrices de gaz à effet de serre et aérosols (typique du milieu du 19ème siècle). D'autres simulations, pour lesquelles des concentrations atmosphériques observées ou estimées des différents agents de forçage anthropiques ont été utilisées, décrivent l'évolution du climat sur la période 1860-2000. Le principe est le même pour estimer les changements climatiques pendant le 21ème siècle, à l'exception du fait que l'évolution des concentrations des gaz à effet de serre et aérosols n'est pas connue. C'est pourquoi plusieurs scénarios d'émission de ces gaz ont été produits en suivant diverses hypothèses sur les évolutions socio-économiques, démographiques et agricoles possibles au cours du 21ème siècle. Ces émissions ont été converties en concentrations et ont servi de données d'entrée aux modèles climatiques (scénarios SRES) (Houghton & al., 2001). Le scénario SRES A1B a été choisi comme scénario d'émission pour le projet VULCAIN, du fait de sa position médiane dans la palette des scénarios disponibles.

Parmi les 21 modèles de climat à grande échelle formant la base de données CMIP3 (hébergée au PCMDI - Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison, Etats-Unis - (PCMDI, 2010)), 5 modèles simulant convenablement le climat de la fin du 20ème siècle sur la région d'intérêt ont été retenus :

- CNRM-CM3 (CNRM-GAME, France)
- MPI-ECHAM5 (MPI, Allemagne)
- HadGEM1 (UKMO, Grande Bretagne)
- NCAR-CCSM3.0 (NCAR, Etats-Unis).
- IPSL-CM4 (IPSL, France)

Les données de précipitations et de température de grande échelle ont été extraites à partir de la base de données du PCMDI pour chaque modèle sur le domaine France, pour les périodes 1980-2000 (référence), 2020-2040 et 2040-2060. Ces périodes futures ont été retenues afin de distinguer un horizon à court terme (2020-2040), pour lequel il est possible de construire des scénarios d'évolution socio-économique à l'échelle de la région ; et un horizon à moyen terme (2040-2060), où l'effet du changement climatique devient véritablement notoire.

Pour effectuer des études d'impacts des changements climatiques à l'échelle régionale d'un bassin versant, telles celle réalisée dans le cadre du projet VULCAIN, une utilisation directe des sorties des Modèles de Circulation Générale n'est pas possible. En effet, leur résolution spatiale est trop grossière pour décrire correctement les phénomènes météorologiques à l'échelle de bassins versant, informations pourtant requises pour mener à bien des modélisations hydrologiques à cette échelle. Pour contourner cette difficulté, il est nécessaire de mettre en œuvre des techniques dites de « régionalisation » de scénarios climatiques.

Différentes approches ont été développées pour produire, à partir des sorties des Modèles de Circulation Générale (GCM), des scénarios climatiques futurs aux résolutions spatiales et temporelles requises pour les analyses d'impact (Hingray, Picouet, & Musy, 2009). Les premières se basent sur des générateurs de temps ou sur des modèles de descente d'échelle. Les modèles de descente d'échelle peuvent être dynamiques ou statistiques. Les données des expériences climatiques nécessaires à leur application n'étant pas toujours disponibles, d'autres méthodes, connues pour la plupart sous le terme de méthodes « delta » ou encore de perturbation, ont été proposées. C'est ce dernier type de méthode qui a été adopté dans le cadre du projet VULCAIN.

Des anomalies moyennes mensuelles entre les sorties des Modèles de Circulation Générale pour le futur et le présent ont ainsi été calculées pour chaque modèle. Utilisées pour perturber les chroniques de pluie,

température et ETP du présent, elles ont permis de produire des chroniques perturbées pour le futur à l'échelle des mailles SAFRAN.

Les ensembles d'anomalies mensuelles moyennes de température et de précipitations, calculées pour les 5 modèles, permettent de rendre compte du changement de climat moyen sur la France entre 2020 et 2060, mais aussi de l'incertitude associée aux modèles de climats, visible au travers des différences inter-modèles. Les résultats de ces travaux sont présentés ci-dessous (§3.1.2).

3.1.2. Résultat des scénarios climatiques : évolution du climat à court et moyen terme

Les résultats des scénarios climatiques établis par Météo France sont présentés ci-dessous. Nous avons dans un premier temps calculé les bilans annuels pour les trois périodes considérées (Tableau 7), puis avons observé l'évolution du climat à l'échelle mensuelle.

Afin de ne garder que le signal climatique moyen et de pouvoir comparer les différentes périodes entre elles, nous considérons dans le Tableau 7 la moyenne multimodèle, pour les périodes futures. La comparaison du comportement des différents modèles entre eux fournit en revanche une caractérisation des incertitudes qui affectent les signaux climatiques moyens.

Tableau 7 : Evolution des principales variables climatiques pour différentes périodes, sur les deux sous bassins versants : Reynès et Argelès.

| Source des données | | SAFRAN | Moyenne multimodèle | |
|---------------------------|---------|-----------|---------------------|-----------|
| Période | | 1980-2000 | 2020-2040 | 2040-2060 |
| Température de l'air (°C) | Reynès | 9.5 | 10.9 | 11.9 |
| | Argelès | 14.1 | 15.5 | 16.5 |
| Pluie (mm/an) | Reynès | 1023.5 | 1015.8 | 922.9 |
| | Argelès | 777.8 | 756.0 | 676.8 |
| Neige (mm/an) | Reynès | 141.3 | 102.3 | 69.5 |
| | Argelès | - | - | - |
| ETP (mm/an) | Reynès | 817.9 | 900.4 | 960.1 |
| | Argelès | 905.1 | 1002.0 | 1071.0 |

Le Tableau 7 montre que la température augmenterait en moyenne de 1,4°C entre les périodes 1980-2000 et 2020-2040, et de 1°C entre les périodes 2020-2040 et 2040-2060. Les modèles de climat prévoient donc une augmentation par décennie plus marquée à moyen terme qu'à court terme. Concernant les pluies, les modèles ne prévoient pas d'évolution franche entre les périodes 1980-2000 et 2020-2040. A l'horizon 2040-2060, en revanche, une diminution d'environ 10% des précipitations moyennes annuelles est prévue. Quant aux précipitations neigeuses, les modèles prévoient une décroissance de 28% à l'horizon 2020-2040 par rapport à la période 1980-2000, et de 32% entre les périodes 2020-2040 et 2040-2060. La diminution des précipitations neigeuses serait, selon ces prévisions, plus marquée et plus rapide à moyen terme qu'à court terme. Les modèles prévoient également une augmentation de l'ETP à court et à moyen terme. Cette augmentation est plus linéaire, et de l'ordre de 2 à 3 % par décennie (Tableau 7). Les mêmes tendances sont prévues pour les deux sous bassins versant du Tech.

A l'échelle mensuelle (Figure 26), nous remarquons que la différence d'ETP et de température entre le présent et le futur est plus marquée pour les mois de la période estivale. Cela se vérifie également pour les précipitations, pour lesquelles la différence entre le présent et le futur est plus marquée entre les mois de Mai et Octobre, mais ce surtout pour la période 2040-2060. Nous remarquons également que la dispersion inter-scénario climatique est plus marquée en période estivale, en observant la différence

entre les courbes représentant les minima et maxima. Ces remarques sont valables à la fois pour le sous bassin versant amont et pour le sous bassin aval.

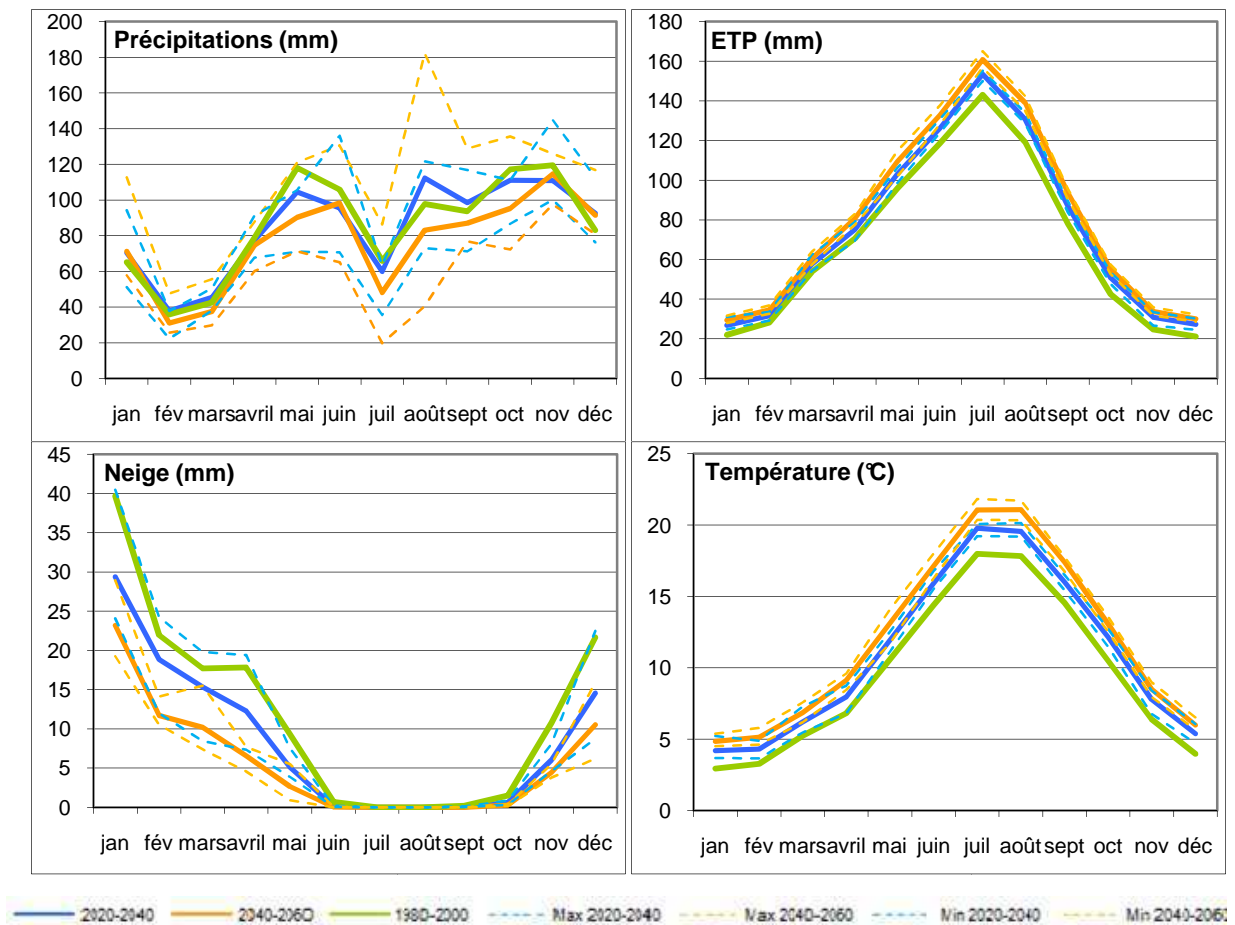


Figure 26 : Courbes à enveloppe représentant les moyennes mensuelles de a. Précipitations, b. Température, c. ETP et d. Précipitations neigeuses, sur le sous bassin versant de Reynès, sur les périodes 1980-2000 (en vert), 2020-2040 (en bleu), et 2040-2060 (en orange). Pour les périodes futures, une enveloppe pour les courbes moyennes est calculée au travers des maxima et des minima mensuels moyens (courbes en pointillés) (permet de représenter la variabilité liée aux modèles climatiques utilisés, pour chaque période). Les mêmes figures pour le sous bassin versant aval sont présentées en Annexe 7.

Ces données climatiques futures sont ensuite introduites en entrée de nos modèles hydrologiques calés et validés au temps présent (présentés au §2.), et permettent ainsi de produire des chroniques de débits futurs (sur les périodes 2020-2040 et 2040-2060) aux deux stations étudiées, pour les cinq scénarios considérés. Les résultats que nous avons ainsi obtenus sont présentés et analysés dans les sections suivantes de ce rapport.

3.2. IMPACT DES SCENARIOS CLIMATIQUES SUR LES DEBITS SIMULES A REYNES ET A ARGELES

3.2.1. Impact du changement climatique sur les bilans hydriques

Afin d'évaluer l'impact du changement climatique sur les bilans hydriques dans le bassin versant du Tech, nous avons calculé les moyennes annuelles de précipitations et de débits simulés pour les deux sous bassins versant, sur nos trois périodes de vingt années. Les résultats sont présentés dans le Tableau 8.

Tableau 8 : Bilans hydriques : moyennes annuelles de précipitations et de débits naturalisés simulés, pour la période actuelle (1980-2000), futur à court terme (2020-2040) et futur à moyen terme (2040-2060). Pour les périodes futures, une moyenne intermodèle a été calculée pour chaque variable, ainsi que l'écart type correspondant. Les pourcentages indiqués en italique représentent la part représentée par la valeur située au dessus par rapport aux précipitations. (Pour plus de détails sur les bilans hydriques correspondant à chaque scénario climatique, se référer à l'Annexe 6).

| REYNES | Σ Précipitations (mm) | Σ Pluie (mm) | Σ Neige (mm) | Qnat simulé Tempo (mm) |
|-------------------|------------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|
| Moyenne 1980-2000 | 1178.20 | 1035.44 <i>88.1%</i> | 142.76 <i>11.9%</i> | 48.83 <i>4.1%</i> |
| Moyenne 2020-2040 | 1131.47 | 1028.50 <i>90.9%</i> | 102.97 <i>9.1%</i> | 44.62 <i>3.9%</i> |
| Ecart type | 59.62 | 51.05 | 18.20 | 5.36 |
| Moyenne 2040-2060 | 1004.39 | 934.84 <i>93.1%</i> | 69.55 <i>6.9%</i> | 38.11 <i>3.8%</i> |
| Ecart type | 83.17 | 79.14 | 10.75 | 4.71 |

| ARGELES | Σ Précipitations (mm) | Σ Pluie (mm) | Σ Neige (mm) | Qnat simulé Tempo (mm) |
|-------------------|------------------------------|------------------------|----------------------|------------------------|
| Moyenne 1980-2000 | 802.36 | 788.35 <i>98.3%</i> | 14.01 <i>1.7%</i> | 105.11 <i>12.7%</i> |
| Moyenne 2020-2040 | 773.82 | 766.44 <i>99.0%</i> | 7.37 <i>1.0%</i> | 94.59 <i>12.2%</i> |
| Ecart type | 45.32 | 45.35 | 2.16 | 11.19 |
| Moyenne 2040-2060 | 689.45 | 685.98 <i>99.5%</i> | 3.47 <i>0.5%</i> | 79.81 <i>11.6%</i> |
| Ecart type | 53.23 | 53.15 | 1.02 | 7.88 |

Pour les deux sous bassins versants du Tech, la tendance est à la baisse des précipitations, corrélée à une baisse des débits, dans le futur. Il est important de noter la baisse de la part du débit par rapport aux précipitations, dans le futur. Cela semble logique, étant donné que les précipitations diminuent tandis que l'ETP augmente (Tableau 8, Tableau 7).

Par ailleurs, à Reynès, la baisse de débit est de l'ordre de 8.6% entre les périodes 1980-2000 et 2020-2040, et de 14.6% entre les périodes 2020-2040 et 2040-2060. A Argelès, cette diminution est de l'ordre de 11.1% entre les périodes 1980-2000 et 2020-2040, et de 14.0% entre les périodes 2020-2040 et 2040-2060. La baisse de débit par décennie, à ces deux stations, est donc notablement plus marquée entre la période actuelle et le futur court terme qu'entre les deux périodes futures.

3.2.2. Impact du changement climatique sur les modules

Nous avons également étudié l'impact du changement climatique sur l'évolution des modules moyens sur vingt années, à court et à moyen termes, en distinguant les résultats issus de chaque scénario climatique. Les résultats sont représentés ci-dessous, en Figure 27.

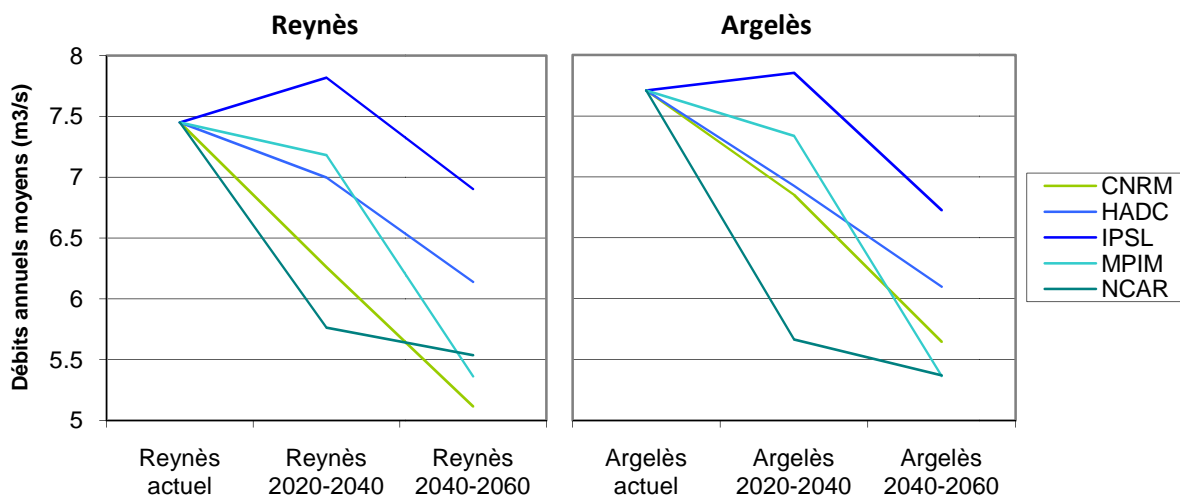


Figure 27 : Evolution des débits naturalisés annuels moyens à Reynès et à Argelès, simulés à l'aide du logiciel Tempo, sur les 3 périodes étudiées, pour les 5 scénarios climatiques.

La Figure 27 présente l'évolution des débits naturalisés annuels moyens entre la période actuelle et les périodes futures. On observe ainsi que les scénarios climatiques construits conduisent à une baisse du débit annuel moyen dans le Tech dans le futur, que ce soit à la station de Reynès ou à celle d'Argelès. Pour tous les scénarios, excepté le scénario IPSL, une baisse des modules^(*) aux stations de Reynès et d'Argelès est prévue à l'horizon 2020-2040, plus ou moins marquée selon les scénarios. La diminution est plus généralisée à l'horizon 2040-2060, et en général plus marquée (excepté pour le modèle NCAR). La dispersion selon le scénario climatique utilisé en entrée de nos modèles est relativement importante ; elle est plus marquée pour la période 2020-2040 qu'à plus long terme (horizon 2040-2060).

3.2.3. Impact du changement climatique sur les débits mensuels moyens

Avant même d'étudier l'impact du changement climatique sur les débits mensuels moyens, en comparant les résultats de simulations sur différentes périodes présente et futures, il nous est apparu intéressant de caractériser la variabilité interannuelle au sein d'une même période. Ainsi, nous avons utilisé les résultats de nos simulations actuelles à Reynès et à Argelès, et représenté sous forme de boîtes à moustaches la répartition des valeurs prises par les débits moyens mensuels pour chaque année de la période 1980-2000 (Figure 28).

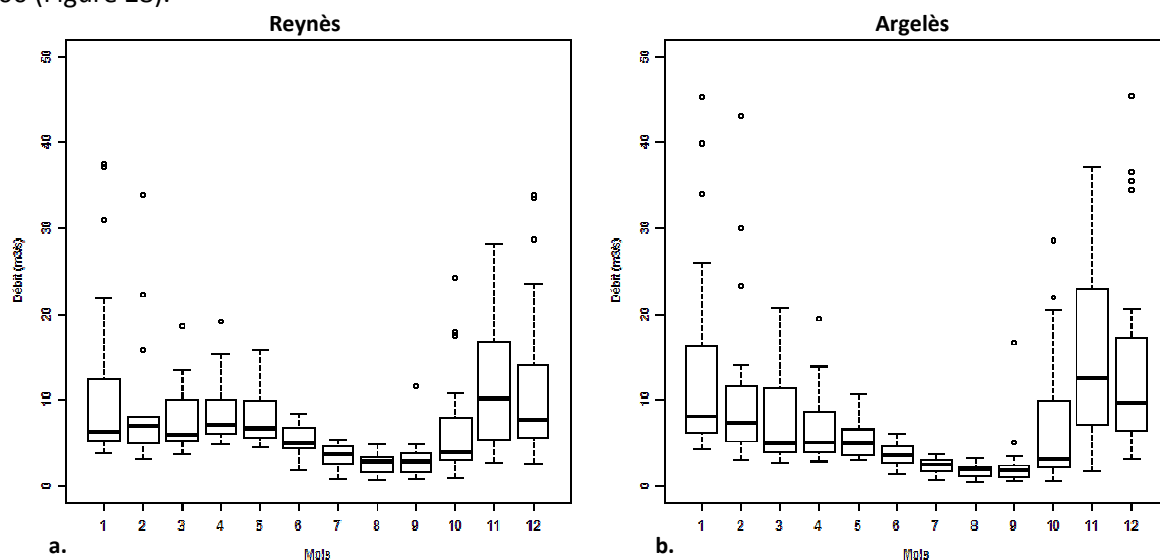


Figure 28 : Graphique en boîtes à moustaches représentant les moyennes mensuelles des débits naturalisés simulés à l'aide de Tempo à Reynès (a.) et à Argelès (b.), pour la période 1980-2000, en exprimant la variabilité interannuelle de ces moyennes mensuelles, pour chaque mois de l'année.

La valeur du premier quartile Q1 (25% des effectifs) correspond au trait inférieur de la boîte. / Celle du 2^{ème} quartile (50% des effectifs) est représenté par un trait horizontal à l'intérieur de la boîte / Celle du 3^{ème} quartile correspond au trait supérieur de la boîte / Les 2 « moustaches » délimitent les valeurs dites adjacentes qui sont déterminées à partir de l'écart interquartile (Q3-Q1) / Les valeurs dites extrêmes, situées au-delà des valeurs adjacentes, sont individualisées – elles sont représentées par des points.

Les graphiques de la Figure 28 permettent de rendre compte de la variabilité interannuelle des débits moyens mensuels simulés sur vingt années, pour la période actuelle (1980-2000). Au vu de ces graphiques, cette variabilité est moins marquée pour la période estivale que sur le reste de l'année, la plus forte variabilité étant repérée en automne, et notamment au mois de Novembre (à relier à une accentuation des extrêmes pluviométriques, mise en évidence par les analyses de données météorologiques sur la période actuelle (Trenberth & al., 2007)).

Nous avons ensuite regroupé les résultats de nos simulations afin d'identifier l'impact éventuel du changement climatique sur les débits mensuels moyens, aux horizons 2020-2040 et 2040-2060. La Figure 29 illustre l'une des représentations possible des résultats obtenus.

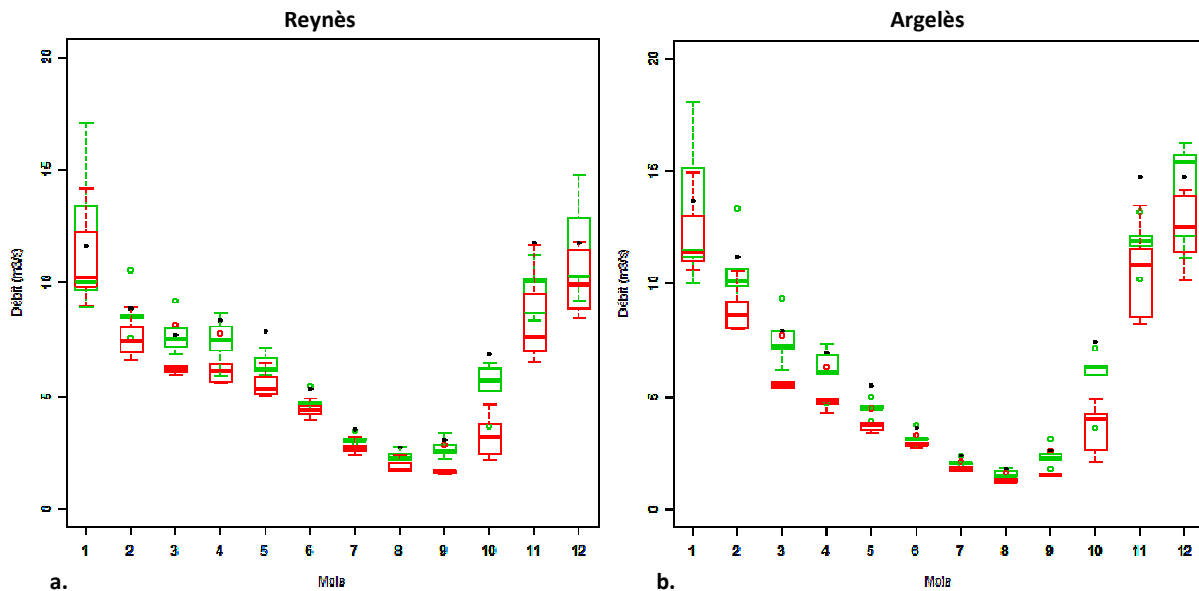


Figure 29 : Graphique représentant les débits mensuels interannuels^(*) simulés à Reynès (a.) et à Argelès (b.), pour les périodes présente (1980-2000 : points noirs) et futures (2020-2040 : boîtes à moustaches vertes ; 2040-2060 : boîtes à moustaches rouges). Les boîtes à moustaches pour les périodes futures représentent la variabilité entre les moyennes mensuelles sur les 20 ans considérés, selon les différents scénarios climatiques employés en entrée des modèles pour réaliser nos simulations.

Que l'on considère la station de Reynès ou celle d'Argelès, les moyennes mensuelles interannuelles des débits naturalisés sur vingt années ont tendance à décroître, entre la période actuelle et les périodes futures (Figure 29). La variabilité inter-scénarios climatiques est moins marquée en période estivale que sur le reste de l'année, que ce soit pour la période 2020-2040 ou la période 2040-2060. Cette variabilité semble particulièrement marquée aux mois de Novembre, Décembre et Janvier (et d'autant plus, sur la période 2040-2060).

Afin de mieux caractériser l'impact du changement climatique sur ces débits dans les deux sous bassins versant du Tech, nous avons conduit une analyse statistique des résultats de simulations obtenus sur nos trois périodes d'étude, pour déterminer, mois par mois, la significativité de la différence prévue entre les débits présents et futurs.

3.2.4. Analyse de la significativité de la différence entre les débits simulés futurs et présents

Dans le cadre de ce stage, une étude statistique a été mise en place afin d'étudier la significativité des différences entre les débits estimés par notre modélisation pour le futur (périodes 2020-2040 et 2040-2060), et les débits présents (période 1980-2000). Pour cela, nous avons utilisé le test de Student-Fisher.

Le test est mené, pour chaque mois de l'année, sur les séries de débits obtenues pour le futur, pour chacun des 5 scénarios étudiés. Il permet de les comparer à chaque série mensuelle de débits actuels. Les tests sont réalisés sur des périodes de durée identique (20 années), et donc sur des séries de données de même taille. Nous avons également effectué ce test sur une série de données « multimodèle », calculée à partir des 5 scénarios pour chacune des périodes futures (moyenne des 5 résultats de simulation utilisant les 5 scénarios climatiques en entrée).

Le test se déroule en deux étapes : dans un premier temps, l'égalité des variances est testée à l'aide du test de Fisher-Snedecor, puis l'égalité des moyennes est testée à l'aide du test de Student. C'est le résultat de ce dernier test qui est nous intéresse ; il est cependant nécessaire d'effectuer le test de l'égalité des variances au préalable, afin de déterminer, selon son issue, quel type de test de Student nous

devons mener. Nous avons effectué ces tests à l'aide du logiciel R. Lorsque la Pvalue obtenue est inférieure à 0.05 (le seuil α est fixé à 5%), le test de Student est significatif, ce qui signifie que l'on rejette l'hypothèse H_0 , qui fait le postulat de l'égalité des moyennes : on peut donc en conclure que nos échantillons ont des moyennes significativement différentes (au seuil $\alpha=5\%$) (Annexe 9).

Les résultats bruts de ces tests statistiques sont présentés en Annexe 10, ainsi qu'une représentation graphique de la significativité mensuelle de la différence entre les débits présents et les débits futurs, calculée pour chaque scénario (Annexe 9). Une représentation graphique de cette significativité, calculée sur les moyennes « multimodèle », est proposée en Figure 30 ci-dessous.

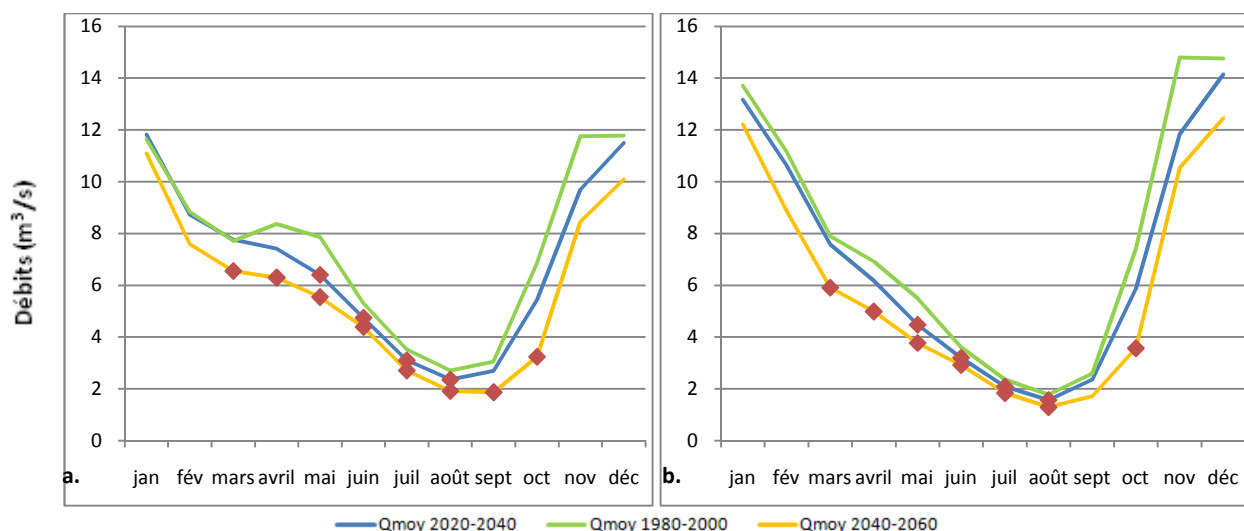


Figure 30 : Débits mensuels moyens interannuels sur 3 périodes de vingt années de simulations, reprenant, pour chaque mois, les résultats de significativité de la différence entre les débits moyens simulés actuels et ceux pour les périodes 2020-2040 d'une part, et 2040-2060 d'autre part. a. résultats pour Reynès ; b. résultats pour Argelès.

Il ressort des résultats de ces tests statistiques effectués sur les moyennes multimodèles (Figure 30) que la différence des débits moyens mensuels entre les périodes futures et la période actuelle est significative pour les mois des périodes printanière et estivale, de manière générale. Nous remarquons également que la différence est plus significative à moyen terme (entre les périodes 2040-2060 et 1980-2000) qu'à plus court terme (entre les périodes 2020-2040 et 1980-2000). En effet, alors que la significativité de la différence des débits moyens mensuels démontrée par ce test est réduite aux mois de Mai à Août pour la comparaison entre les périodes 2020-2040 et 1980-2000, elle s'étend aux mois de Mars à Octobre lorsque l'on effectue la comparaison entre les périodes 2040-2060 et 1980-2000. Ces constats sont valables aussi bien pour la station d'Argelès que pour celle de Reynès (la seule différence entre les deux stations étant le résultat du test entre les moyennes des périodes 2040-2060 et 1980-2000 au mois de Septembre, qui est significatif à Reynès et non à Argelès).

Les résultats de ces tests confirment les constats visuels émis précédemment. Ils permettent de prédire qu'au vu de nos simulations, le changement climatique devrait avoir un impact sur les débits futurs du Tech dès le court terme, celui-ci étant significatif pour les mois de Mai à Août. De plus, selon ces résultats, l'impact devrait se renforcer à plus long terme, et devenir significatif sur une plus large période de l'année (des mois de Mars à Octobre).

Par la suite, nous avons étudié plus en détails ces diminutions de débits liées au changement climatique, aux stations de Reynès et d'Argelès.

3.2.5. Caractérisation de l'impact du changement climatique sur le fonctionnement hydrogéologique du bassin versant du Tech

La Figure 31 ci-dessous représente les débits mensuels interannuels simulés pour les périodes 1980-2000, 2020-2040 et 2040-2060, aux stations de Reynès et d'Argelès. Pour chacune des périodes futures, les débits présentés correspondent à la moyenne de ceux obtenus par nos simulations pour les différents scénarios climatiques.

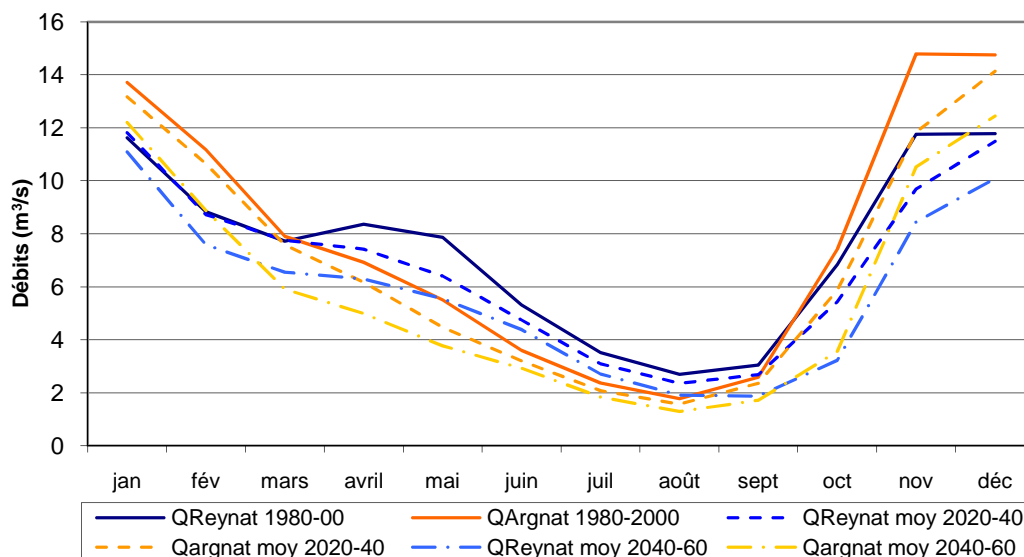


Figure 31 : Comparaison, pour les 3 périodes d'étude (1980-2000, 2020-2040 et 2040-2060), des débits naturalisés mensuels interannuels à Reynès (3 courbes bleues) et à Argelès (3 courbes oranges). Pour chacune des périodes futures, les débits présentés correspondent à la moyenne de ceux obtenus pour les différents scénarios climatiques.

Tout d'abord, le graphique de la Figure 31 montre que de manière générale, la distribution mensuelle des débits mensuels interannuels^(*) futurs est semblable à l'actuelle, avec une tendance à la baisse, plus marquée pour le futur à moyen terme qu'à court terme, pour les deux stations. De même qu'actuellement, le débit mensuel interannuel à Argelès devient inférieur à celui de Reynès aux périodes printanière et estivale. Il semble cependant que le moment où ce débit à Argelès devient inférieur au débit à Reynès est en moyenne plus tôt dans l'année, pour les périodes futures.

En outre, cette Figure 31 montre une baisse des débits à Reynès, qui se répercute à Argelès, au printemps, sur la période avril-mai. Cette baisse est sûrement en grande partie liée à la diminution sensible des précipitations neigeuses prévue dans le futur. Le débit lié à la fonte de neige, qui s'écoule en général à cette période de l'année, est donc amené à s'amoinrir fortement. Ce phénomène est très marqué dès le passage à la période 2020-2040, et s'amplifie pour la période 2040-2060.

Par ailleurs, la Figure 31 permet de mettre en évidence une diminution moins marquée des débits estivaux à Argelès qu'à Reynès, entre le présent et le futur. Cela pourrait s'expliquer par la présence de la nappe alluviale sous ce sous-bassin versant, qui joue un rôle de « tampon » (repérable de Juillet à Septembre, ici). Ainsi, la présence de la nappe alluviale permettrait, dans une certaine mesure, de limiter l'impact du changement climatique en surface dans la zone d'étude considérée (le sous bassin versant d'Argelès). Cela pourrait également expliquer le fait que la différence de moyennes mensuelles du mois de Septembre entre les périodes 2040-2060 et 1980-2000 ne soit pas significative à Argelès, tandis qu'elle l'est à Reynès (Figure 30).

Ces constats peuvent être étayés par une étude de l'évolution future des débits spécifiques estimée par nos simulations, dans les sous bassins versants de Reynès et d'Argelès (Figure 32).

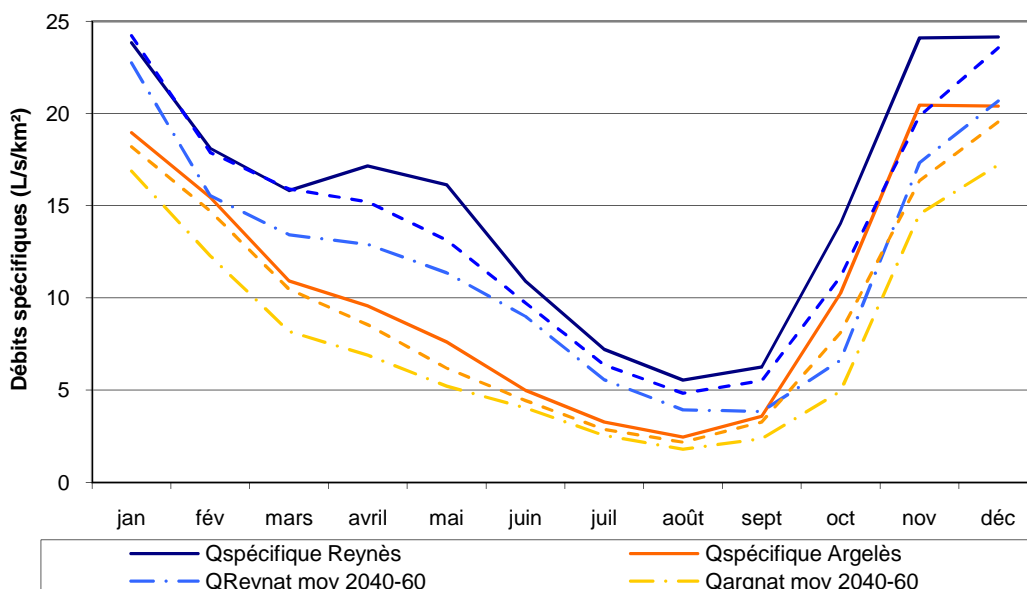


Figure 32 : Comparaison pour les 3 périodes (1980-2000, 2020-2040 et 2040-2060) des moyennes mensuelles de débits naturalisés spécifiques à Reynès, et à Argelès.

Au vu des débits spécifiques représentés dans la Figure 32, il est prévu que la « productivité » du sous-bassin versant amont reste plus importante que celle de l’aval, quelle que soit la période considérée. L’effet tampon joué par la nappe alluviale est également repérable sur ce graphique, de Juillet à Septembre.

3.3. DISCUSSION

Tout d’abord, il est important de noter que les résultats de simulations que nous avons obtenus sont à prendre avec précaution, les incertitudes liées à de telles prévisions des débits futurs dans un bassin versant étant importantes. Bien que nous n’ayons pu les quantifier, celles-ci sont probablement notables, existent à différents niveaux, et s’y répercutent.

En effet, tout d’abord, les résultats présentés sont largement dépendants des données issues des scénarios climatiques utilisés. Les incertitudes inhérentes à ces derniers sont à l’origine relativement importantes, et non quantifiées. Il a été choisi d’en considérer plusieurs dans notre démarche, afin d’avoir un panel des possibles, et de limiter l’incertitude liée au choix d’un unique scénario. Par ailleurs, le choix même des scénarios considérés pourrait être discuté : le fait de choisir d’autres scénarios aurait conduit à des résultats probablement différents.

Les résultats obtenus sont également largement dépendants de la méthode de régionalisation des données issues des scénarios globaux. Afin de traiter de l’incertitude inhérente à cette méthode de régionalisation en particulier, il aurait été intéressant de réaliser les mêmes simulations, se basant sur les mêmes données issues des scénarios globaux, mais en utilisant une méthode de régionalisation différente. Ce travail a été débuté au cours de ce stage : les données climatiques issues d’une méthode de changement d’échelle différente, élaborée par le CERFACS, ont été traitées. Les simulations intégrant ces nouvelles données d’entrée seront prochainement réalisées, et les résultats comparés à ceux obtenus ici, afin de mettre en évidence l’étendue de l’incertitude liée à la méthode de régionalisation employée.

Enfin, une incertitude importante reste liée à nos modèles eux-mêmes. En effet, comme évoqué à la partie précédente (§2), dans toute démarche de modélisation, il est important de rester conscient que le modèle mis en place ne représente qu’une vision de la réalité. Tous les résultats obtenus sont ainsi

dépendants des hypothèses émises, et des choix de modélisation opérés. Ainsi, il aurait été intéressant de pouvoir comparer les résultats de nos simulations futures aux résultats obtenus par un modèle différent, ce qui nous aurait permis de caractériser l'incertitude liée à la démarche de modélisation en elle-même, dans une certaine mesure. Il est probable que cette comparaison soit faite ultérieurement, après avoir effectué des simulations par le modèle GR2M prenant en entrée les mêmes données climatiques futures.

Suite à l'ensemble de cette démarche, nous ayant conduit à reproduire les débits futurs dans le bassin versant du Tech, et permettant ainsi de caractériser l'impact du changement climatique sur ceux-ci, l'étape suivante a été d'étudier, sur la base de ces résultats, la vulnérabilité de ce bassin versant à ces changements climatiques, mais également aux changements socio-économiques.

4. ETUDE DE LA VULNERABILITE DU TERRITOIRE ETUDIE AUX CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET SOCIO-ECONOMIQUES

L'étude de la vulnérabilité du territoire aux changements climatiques et socio-économiques nécessite d'introduire des données concernant l'évolution probable des prélèvements, et donc d'avoir une estimation de ces prélèvements en eau futurs. L'évolution des prélèvements étant très incertaine, notamment pour l'agriculture, la démarche s'est appuyée sur une démarche prospective dite « méthode des scénarios ». Différents scénarios ont été imaginés, ce qui permet de rendre compte de l'incertitude liée à de telles données.

4.1. ESTIMATIONS DES PRELEVEMENTS NETS EN EAU FUTURS

Une démarche a été élaborée et conduite par le BRGM et le bureau d'études BRLi, afin d'estimer les besoins futurs en eau dans la région étudiée.

Le travail a été réalisé au travers d'ateliers de réflexion, impliquant différents types d'acteurs. Deux groupes de réflexion ont ainsi été réunis au cours de l'année 2008, pour étudier chacun des deux grands postes de consommation : l'alimentation en eau potable (AEP) d'une part, et l'irrigation d'autre part. Pour chaque groupe de réflexion, deux ateliers de prospective ont eu lieu afin d'aboutir à une estimation des consommations futures pour l'horizon 2030 (utilisables pour la période 2020-2040).

4.1.1. Scénarios pour l'alimentation en eau potable future

Des acteurs d'origines variées, experts du territoire pour la problématique eau potable, ont été réunis pour le déroulement de ces ateliers de réflexion (qui se sont tenus en 2008).

Le 1^{er} atelier a permis de présenter et expliquer la démarche prospective au groupe de réflexion, puis de se baser sur une analyse de la situation passée pour imaginer ce qui pouvait se passer dans le futur, dans le but d'identifier les grands facteurs de changement. Ainsi, à l'issue de cette première réunion, les facteurs de changement retenus sont les suivants :

- | | | |
|---------------|-------------------|---------------------|
| - Démographie | - Réseaux | - Forages |
| - Urbanisme | - Economies d'eau | - Canaux |
| - Tourisme | - Tarifs | - Gestion concertée |

En se basant sur les résultats du premier atelier, et en reprenant les grands facteurs de changements identifiés à l'issue de celui-ci, un travail de déclinaison des différentes tendances possibles pour chaque facteur a été effectué par les chercheurs du projet. Par la suite, chaque acteur a dû choisir parmi les tendances proposées pour chaque facteur, avec pour consigne finale d'imaginer des combinaisons

recréant trois scénarios contrastés. Les résultats obtenus ont permis de créer trois scénarios contrastés moyens (Annexe 8), à partir desquels il a été possible de produire des estimations des prélèvements futurs (pour la période 2020-2040) à l'aide des modèles mis en œuvre pour calculer les besoins en eau pour l'alimentation en eau potable actuels (§ 2.1.2.4.1). Les trois scénarios retenus et les tendances associées à chacun sont présentés ci-dessous, dans le Tableau 9.

Tableau 9 : Scénarios des besoins en eau pour l'alimentation en eau potable future, à l'horizon 2020-2040.

| Facteurs \ Scénarios | 1.« Développement anarchique et perte de vitesse du territoire » | 2.« Dynamisme territorial durable » | 3.« Tendancier timide » |
|--|--|-------------------------------------|-------------------------|
| Population | ↘ -25 000 hab. | ↗ + 140 M hab. | ↗ +100 000 hab. |
| Tourisme | ↗ (type Costa Brava) | → (équilibré) | → (déséquilibré) |
| Rendement | ↘ | ↗ | → |
| Economies d'eau (%) | gaspillage : 5 % | économie : 10 % | économie : 5 % |
| Evolution du Volume total d'eau potable consommée | +14 M m ³ | - 5 M m ³ | +5 M m ³ |

Selon ces 3 scénarios, il a été estimé que la demande en eau potable future, pour la période 2020-2040, se situerait dans une fourchette de [-9% ; +25%] par rapport au présent.

4.1.2. Scénarios pour la demande en eau agricole future

De même que pour les prélèvements en eau potable, un groupe d'acteurs institutionnels (experts agricoles locaux) a été réuni à deux reprises afin d'aboutir à une estimation des besoins futurs en eau pour l'irrigation, dans le département des Pyrénées Orientales.

Un premier atelier de réflexion s'est tenu en 2008, avec pour but d'identifier les facteurs de changement passés et futurs importants du point de vue des acteurs locaux. Les participants à l'atelier ont exprimé leur difficulté d'avoir une vision pour l'agriculture à long terme étant donné l'étendue des incertitudes sur l'avenir des filières à court terme. De ce fait, par la suite, une démarche différente de celle mise en place pour la réflexion sur l'alimentation en eau potable a été adoptée. En effet, pour le second atelier, il a été choisi de présenter aux acteurs quatre scénarios, préétablis par le BRGM et BRLi. L'établissement de ces scénarios s'est appuyé sur une prospective existante à l'échelle nationale, dite « prospective du groupe de la Bussière », réalisée pour le ministère de l'environnement et le ministère de l'agriculture (Poux, 2006)). Ils sont présentés ci-dessous, dans le Tableau 10. Ces scénarios ont été déclinés en les adaptant au territoire des Pyrénées Orientales.

Tableau 10 : Quatre scénarios futurs d'évolution des besoins en eau pour l'usage agricole (établis par le BRGM et BRLi).

| | |
|--|---|
| 1. Agriculture ultra moderne, compétitive | Exploitations fortement capitalisées, maîtrisées par l'aval. |
| 2. Agriculture duale | Combine le 1 ^{er} modèle d'agriculture compétitive et un type d'agriculture très subventionné (agriculteurs considérés comme « jardiniers » entretenant et aménageant le territoire). Dans ce modèle, agriculture productive et multifonctionnelle coexistent. |
| 3. « Sud intense » ou l'Europe des régions | Régionalisation des territoires. Ce type d'agriculture cultive des produits de qualité à forte valeur ajoutée, et développe une politique régionale forte et une image de marque des terroirs. |
| 4. Agriculture Haute Performance Environnementale (HPE) | Se soumet à une attente environnementale exacerbée, dans un contexte d'interdiction des produits phytosanitaires... Agriculture renaissante, créant de l'emploi et développant des technologies pour l'environnement et la santé. |

Les quatre scénarios déclinés sur le territoire des Pyrénées Orientales furent ensuite soumis à discussion des experts locaux, dans le cadre d'un deuxième atelier. La discussion portait sur la déclinaison locale et non sur les cadrages national et européen, considérés comme imposés ; le but des discussions était de critiquer les scénarios préétablis et d'ajuster les hypothèses aux points de vue des acteurs. De cet atelier, est ressorti un classement des scénarios selon deux axes : du plus au moins probable d'un côté, et du plus au moins souhaitable de l'autre :

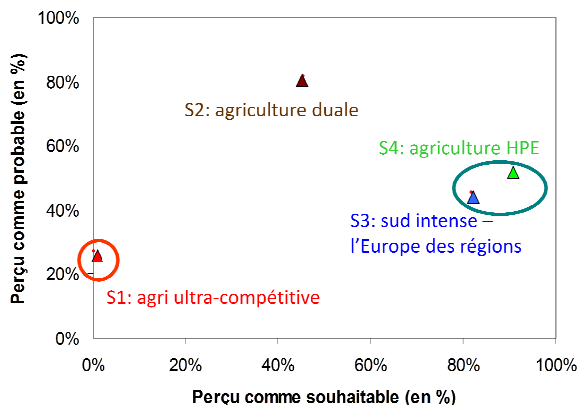


Figure 33 : Graphique représentant les caractères « souhaitable » et « probable » de chaque scénario tendanciel d'évolution des prélèvements agricoles à l'horizon 2030.

Au cours de la discussion, est ressorti qu'une évolution à court terme était pressentie vers le scénario 2, situation transitoire qui pourrait permettre de s'acheminer à plus long terme vers les scénarios 3 et 4. Ces derniers sont eux perçus comme des scénarios exprimant de réels projets souhaitables pour l'agriculture régionale. Le scénario 1 fut considéré comme à la fois non souhaitable et peu probable.

Pour évaluer les prélèvements en eau pour l'irrigation, deux scénarios contrastés par rapport à leur caractère souhaitable ou non ont finalement été retenus : le scénario 1 ; et un scénario établi à partir des scénarios 3 et 4. Après traduction des scénarios en hypothèses d'évolution des surfaces des différentes cultures présentes sur le territoire, les prélèvements nets à l'horizon 2030 ont été estimés pour ces deux scénarios, en utilisant le modèle développé pour estimer les prélèvements agricoles actuels élaboré par le bureau d'études BRLi.

4.1.3. Six scénarios de prélèvements futurs à l'horizon 2020-2040

Afin de déterminer les prélèvements correspondant aux différents scénarios futurs d'usage de l'eau, nous combinons les 3 scénarios établis pour l'estimation des prélèvements pour l'alimentation en eau potable et les 2 scénarios établis pour l'irrigation. Nous avons ainsi 6 scénarios d'évolution possible des prélèvements pour la période 2020-2040 (répertoriés dans le Tableau 11).

Tableau 11 : Création des 6 scénarios de prélèvements en eau futurs, à partir des combinaisons de scénarios pour les besoins en eau pour l'irrigation (vert) et pour l'alimentation en eau potable (AEP, en bleu).

| | AEP | 1. Développement anarchique | 2. Dynamisme durable | 3. Tendanciel timide |
|---|-----|-----------------------------|----------------------|----------------------|
| Irrigation | | | | |
| 1. Agriculture ultracompetitive | | Scénario A | Scénario C | Scénario E |
| 3/4. Agriculture régionale et Haute Performance Env | | Scénario B | Scénario D | Scénario F |

Les moyennes mensuelles des prélèvements exprimés sous forme de débits dans les deux sous bassins versant étudiés pour chaque scénario sont représentées en Figure 34.

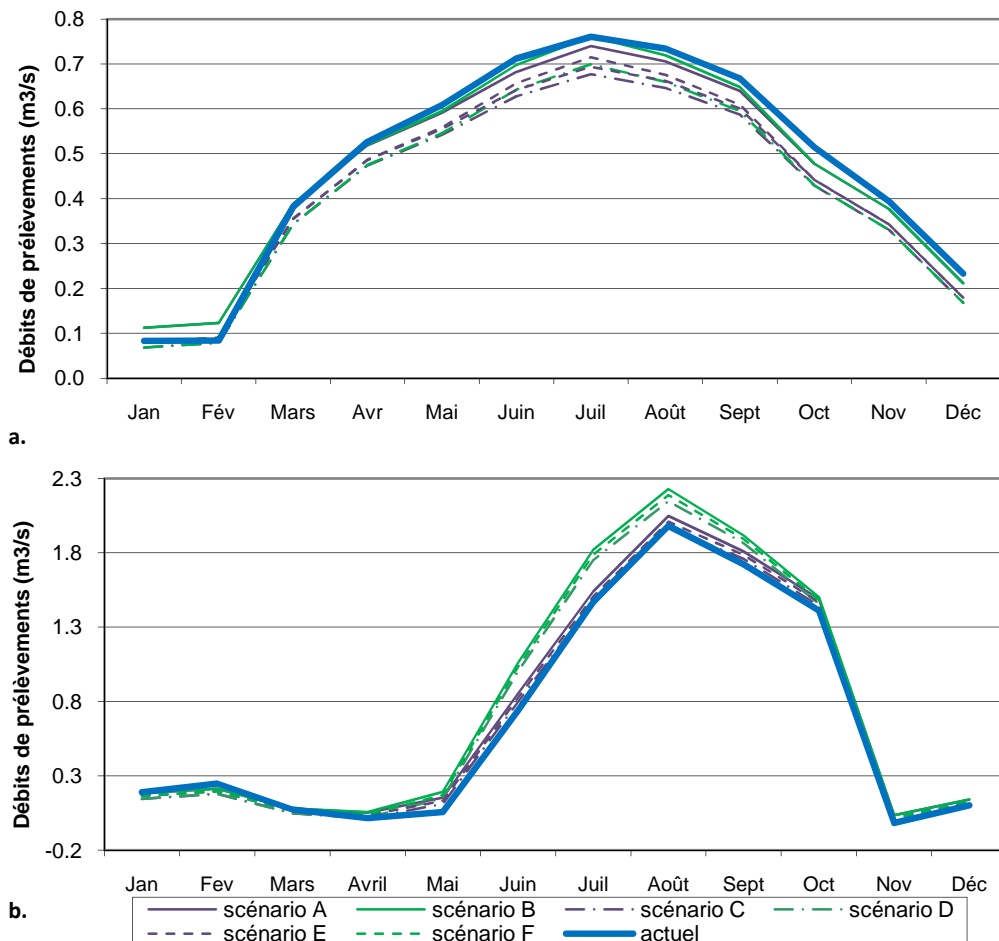


Figure 34 : Résultat de l'analyse prospective sur les débits de prélèvements estimés pour les sous bassins versant de Reynès (a.) et d'Argelès (b.), selon différents scénarios, pour le futur (horizon 2020-2040). Pour comparaison, les débits de prélèvements moyens mensuels (calculés sur la période 2000-2005) ont été ajoutés (bleu, gras).

La Figure 34 permet tout d'abord de remarquer que les débits de prélèvements moyens mensuels sont plus de 2,5 fois plus importants dans le sous bassin aval qu'en amont, quel que soit le scénario considéré (au présent également). Les prélèvements futurs estimés par les différents scénarios présentent la même allure de répartition mensuelle qu'au présent, pour les deux sous bassins versants. Alors que les estimations de prélèvements futurs sont moins importantes que les prélèvements présents en amont, la tendance est inversée en aval, où les estimations de prélèvements futurs sont plus importantes que pour le présent, quel que soit le scénario. La diminution des prélèvements estimée en amont à l'horizon 2020-2040, ainsi que l'augmentation estimée en aval, sont toutes deux plus marquées sur les mois de Juillet, Août et Septembre.

Dans le sous bassin de Reynès, la différence est peu marquée entre les six scénarios de prélèvements. En revanche, en aval, une démarcation de deux groupes de 3 scénarios apparaît. En effet, les 3 scénarios établis à partir du scénario agricole « Agriculture régionale et Haute Performance Environnementale » présentent des besoins en eau plus important que les 3 autres, à l'horizon 2020-2040.

4.2. MODE DE CARACTERISATION DE LA VULNERABILITE ET CHOIX DES DEBITS D'OBJECTIFS D'ETIAGE

Pour pouvoir approcher la vulnérabilité du territoire en termes de ressource en eau, la première phase du travail a consisté à définir un indicateur de référence pour les cours d'eau. Classiquement, dans les études d'impact du changement climatique, les débits moyens mensuels, ou certains débits

caractéristiques (tels le QMNA), ou encore des valeurs extrêmes, sont comparés entre le futur et le présent (Boé & al., 2009), (Etchevers & al., 2002), (Caballero & al., 2007). La caractérisation de la vulnérabilité nécessite de définir un ou des seuils en dessous desquels le cours d'eau se trouve dans une situation telle que son fonctionnement et/ou son usage sont mis en difficulté.

La Préfecture du département des Pyrénées Orientales a établi, pour surveiller la situation dans les cours d'eau de ce département, plusieurs seuils, qui peuvent être utilisés comme des références auxquelles comparer l'évolution des débits du futur. Un arrêté cadre paru en 2007 définit en effet les seuils considérés critiques au regard de la ressource en eau disponible à chaque période de l'année (Préfecture des Pyrénées Orientales, 2007). Il se base sur le calcul des VCN3^(*) pour définir trois seuils (de vigilance, d'alerte et de crise) qu'il préconise de comparer aux débits à la station définie, pour établir s'il est nécessaire d'appliquer des restrictions d'usage. Ces seuils ont été établis à partir débits observés aux stations (débits influencés). Pour notre étude, nous avons recalculé ces mêmes seuils sur la base des débits naturalisés, de manière à pouvoir comparer les débits naturalisés futurs à ces seuils. Nous avons donc défini les valeurs de VCN3^(*) de périodes de retour^(*) 3.5, 5 et 8 ans, sur chaque décade entre le 18/02 et le 30/09. Ces calculs ont été effectués en prenant les valeurs de débits naturalisés simulés à Reynès et à Argelès, des années 1980 à 2000. Les seuils ainsi définis à la station de Reynès sont représentés Figure 35.

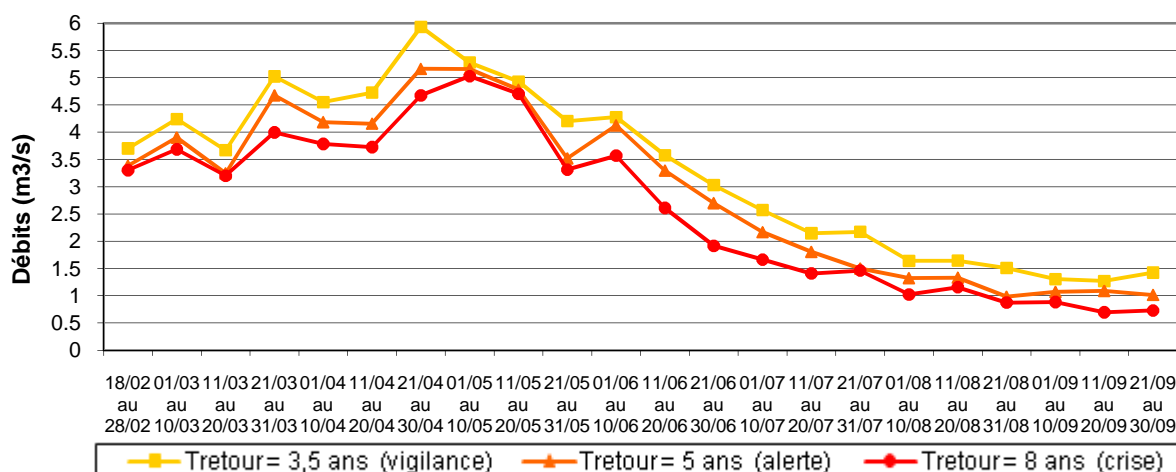


Figure 35 : Courbes caractéristiques des débits naturalisés minimaux sur 3 jours consécutifs (VCN3) de périodes de retour 3.5 ans, 5 ans et 8 ans. Débits établis par décades. Calculs réalisés sur les données simulées actuelles (période 1980-2000) à la station de Reynès.

Cette démarche revient à définir un débit d'objectif d'étiage^(*) (DOE), c'est-à-dire un débit seuil censé permettre un équilibre entre l'ensemble des usages de l'eau et le bon fonctionnement de l'écosystème. Ce type d'approche est notamment utilisé dans des études visant à définir un plan de gestion des étiages (PGE) dans un bassin versant donné (Eaucéa, 2007) et permet de fixer des débits seuils pour chaque sous-bassin versant. Selon son niveau, le DOE peut cependant représenter un choix stratégique visant à privilégier un ou des usages jugés prioritaires ou au contraire, à privilégier des fonctionnalités du milieu aquatique (préservations d'habitats, d'espèces rares, dilution de la pollution) et ses fonctions support d'activités récréatives type baignade et canoë kayak.

Une analyse statistique basée sur la comparaison des débits du cours d'eau au DOE permet de caractériser le risque de défaillance associé à la période étudiée. Le choix du DOE et d'une fréquence de dépassement « acceptable » font donc partie des paramètres de la gestion de l'eau du bassin versant. En effet, une fréquence de dépassement non nulle peut être acceptable, si elle reste limitée et permet d'assurer tous les usages tout en impactant de manière mineure le cours d'eau.

Ainsi, à partir de nos trois seuils de VCN3, nous avons calculé, pour chaque période de vingt années étudiée, la « fréquence de dépassement », correspondant au nombre de fois où la valeur du minimum de débit trijournalier sur la décade considérée, sur l'année considérée, est inférieure aux valeurs seuil fixées (présenté dans l'équation ci-dessous).

$$F \text{ dépassement} = \frac{\text{Nombre de décades où } (Q_{\text{minimum trijournalier de la décade } i} < Q_{\text{Seuil fixé}})}{\text{Nombre de décades total}}$$

Nous calculons les volumes de déficit pour l'ensemble des périodes de dépassement des seuils, afin de compléter l'information d'ordre fréquentiel par une information quantitative. Ainsi, pour chaque décade où le minimum de débit trijournalier est inférieur à l'un des seuils, nous calculons la différence de débit entre le seuil de VCN3 fixé et la chronique étudiée, que nous ramenons à un volume et intégrons sur la totalité de la période étudiée (de Février à Septembre). Ce calcul est présenté dans l'équation ci-dessous :

$$V \text{ déficit} = \sum_j (Q_{\text{seuil décade déficitaire } j} - Q_{\text{minimum trijournalier de la décade déficitaire } j})$$

La Figure 36 ci-dessous illustre ces méthodes de calculs.

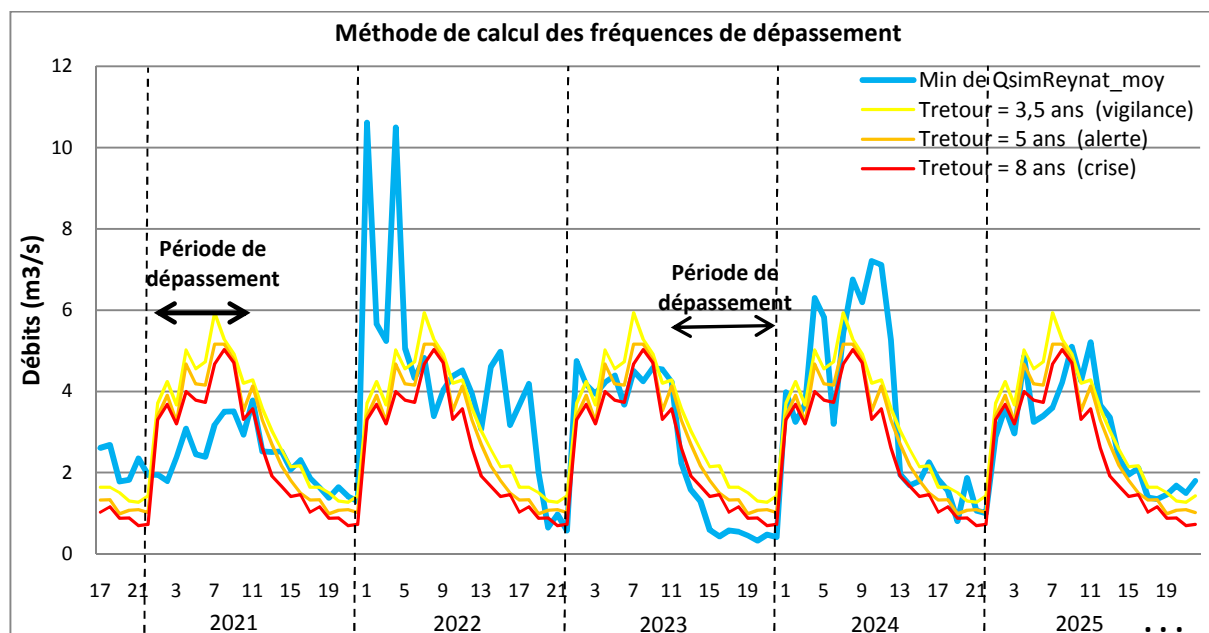


Figure 36 : Méthode de calcul des fréquences de dépassement, sur une période donnée, des débits naturels (courbe bleue), par rapport à nos trois seuils de VCN3 de périodes de retour 3.5, 5 et 8 ans (courbes respectivement jaune, orange et rouge). Les volumes de déficit par rapport à un seuil correspondent à la somme des surfaces entre la courbe bleue et la courbe représentant le seuil considéré, lorsque l'on est en période de dépassement.

Tableau 12 : Résultats des calculs de taux de défaillance et de volumes de déficit, sur la période 1980-2000, à la station de Reynès.

| | T retour 3.5 ans | T retour 5 ans | T retour 8 ans |
|--------------------------------------|------------------|----------------|----------------|
| Fréquence de dépassement (%) | 30.0 % | 20.0 % | 15.0 % |
| Volume de déficit (Mm ³) | 4.11 | 2.35 | 1.34 |

Nous remarquons qu'avec le choix de tels seuils, la fréquence de dépassement est élevée, sur la période 1980-2000 : par rapport au seuil VCN3 période de retour 3.5 ans par exemple, le cours d'eau serait en situation de dépassement 30% du temps. Ces seuils peuvent donc être considérés comme sévères (il pourrait par exemple être considéré comme trop contraignant de choisir un DOE correspondant au seuil de VCN3 temps de retour 3.5 ans).

Dans la suite de notre démarche, nous avons donc choisi de ne garder, parmi ces trois seuils, que celui correspondant au VCN3 de période de retour 8 ans (le moins contraignant des trois), pour chacun des deux sous bassins versants étudiés. Ce seuil sera donc utilisé comme un débit d'objectif d'étiage possible pour le futur.

Mais dans la mesure où l'allure de ce DOE apparaît relativement complexe (une valeur seuil différente étant définie pour chaque décade considérée), il apparaît intéressant d'en définir un second, plus simple a priori pour un gestionnaire et un peu moins contraignant que le premier. Considérant que l'année hydrologique contient deux grandes périodes distinctes (hautes eaux et étiage), nous l'avons défini comme pouvant prendre deux valeurs, entre Février et Septembre. Ces valeurs ont été définies comme suit :

1. de Février à Mai : niveau haut relatif défini de telle sorte que la fréquence de dépassement soit nulle sur cette période, pour la période actuelle (1980-2000).
2. de Juin à Septembre : niveau situé légèrement en dessous du dixième du module (seuil utilisé depuis la dernière loi sur l'eau (LEMA) pour déterminer le débit réservé d'un cours d'eau).

Ce deuxième seuil est également défini comme débit d'objectif d'étiage.

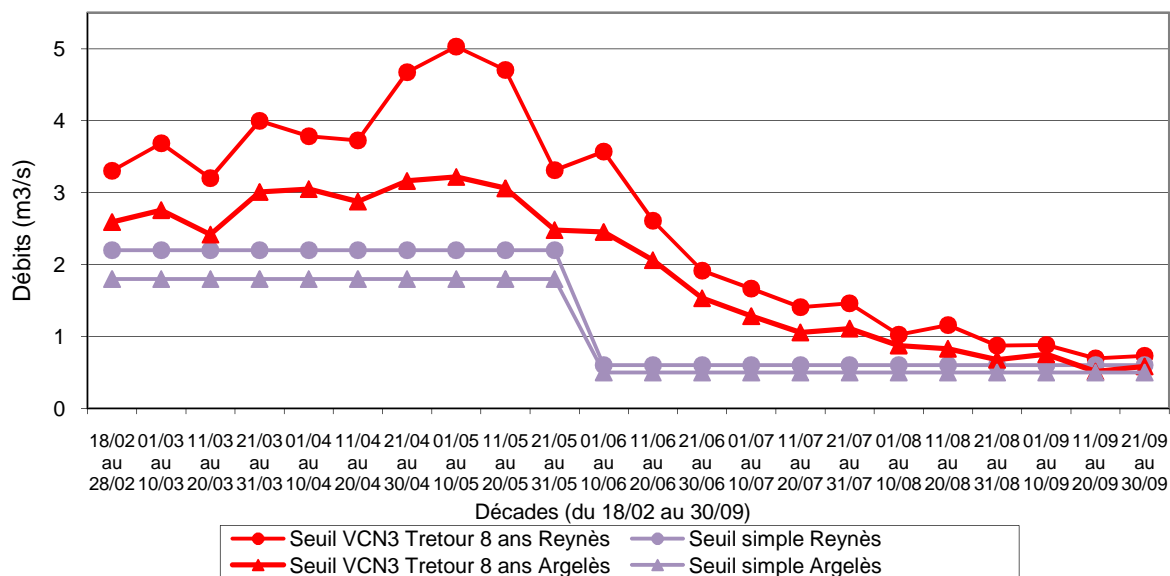


Figure 37 : Deux seuils fixes comme Débits d'Objectifs d'Etiages (DOE), pour Le Tech, aux stations de Reynès (marqueurs circulaires) et d'Argelès (marqueurs triangulaires).

Nous comparerons, dans notre étude, les résultats obtenus suite à la définition de ces deux types de seuils comme des débits d'objectif d'étiage, que l'on peut considérer comme des valeurs extrêmes pour ce type de critère.

L'objectif de notre démarche est ensuite de déterminer l'impact du changement climatique, mais également des évolutions d'ordre socio-économique, sur le franchissement de ces seuils (DOE).

4.2.1. Etude de vulnérabilité future vis-à-vis des scénarios climatiques

Dans le but de déterminer l'impact du changement climatique sur le franchissement de nos deux DOE, nous avons dans un premier temps comparé les fréquences de dépassement F ainsi que les volumes de déficit annuels moyens correspondant, entre la période présente et les périodes futures (2020-2040 et 2040-2060). Ces calculs sont basés, pour chaque période future, sur une chronique de débits calculée,

correspondant à la moyenne des résultats des simulations hydrologiques pour les 5 scénarios climatiques.

Analyse sur le Tech amont :

Tableau 13 : Fréquences de dépassement et volumes moyens "annuels" de déficit en eau par rapport aux deux DOE, pour chacune des 3 périodes (présente et futures), à Reynès. Calculs effectués sur les débits naturels (a.), et sur les débits influencés (b.).

| a. Analyse sur les débits naturels | | 1980-2000 | 2020-2040 | 2040-2060 |
|---|------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Seuil VCN3 Tretour 8 ans | F dépassement (%) | 15.0 % | 23.4 % | 33.2 % |
| | V déficit (Mm ³) | 1.34 | 2.05 | 3.69 |
| Seuil simple | F dépassement (%) | 1.4 % | 3.0 % | 6.4 % |
| | V déficit (Mm ³) | 0.04 | 0.07 | 0.21 |

| b. Analyse sur les débits influencés | | 1980-2000 | 2020-2040 | 2040-2060 |
|---|------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Seuil VCN3 Tretour 8 ans | F dépassement (%) | 28.4 % | 37.5 % | 52.5 % |
| | V déficit (Mm ³) | 3.79 | 5.37 | 8.52 |
| Seuil simple | F dépassement (%) | 10.2 % | 13.9 % | 20.0 % |
| | V déficit (Mm ³) | 0.77 | 1.04 | 1.87 |

D'après le Tableau 13.a, nous remarquons qu'à Reynès, les fréquences de dépassement ainsi que les volumes de déficit sont bien plus élevés si l'on considère le seuil de VCN3 que si l'on considère le seuil simple. Ceci semble logique, étant donné la plus forte contrainte imposée par le premier seuil. Par ailleurs, nous remarquons que les valeurs prises par ces deux indicateurs augmentent entre le présent et le futur : les chroniques de débits futurs simulées impliquent un franchissement des seuils et des volumes de déficit plus importants. L'impact du changement climatique est cependant évalué différemment selon le seuil considéré : l'augmentation des deux indicateurs est plus « linéaire » avec le seuil VCN3 qu'avec le seuil simple. En effet, alors que pour le seuil de type VCN3, le volume de déficit est multiplié par 1.5 entre les périodes actuelle et du futur proche, puis par 1.8 entre les deux périodes futures, le facteur multiplicatif passe de 1.7 à 3 entre ces mêmes périodes, pour le seuil simple. Cela pourrait s'expliquer par la définition même de ces deux seuils : la distribution temporelle du seuil de VCN3 suit celle de l'évolution du débit dans le cours d'eau, ce qui peut expliquer que l'impact lié au changement climatique se traduise plus progressivement que pour le seuil simple, défini de manière plus brutale, puisque prenant seulement deux valeurs distinctes au cours de l'année. Notons par ailleurs qu'étant donné que les deux DOE prennent des valeurs proches à la fin de l'étiage, on peut supposer que la différence est liée à une augmentation des dépassements plus tôt dans l'année.

Lorsque l'on travaille sur les débits influencés (Tableau 13.b), les fréquences de dépassement ainsi que les volumes de déficit sont élevés, et ce dès le temps présent. En revanche, l'« aggravement » de la situation dans le futur est moins marqué que lorsque l'on travaille sur les débits naturels, et ce pour les deux seuils considérés. En effet, alors que lorsque l'on travaille sur les débits naturels, les volumes de déficit sont multipliés entre le présent et le futur respectivement par 3 et par 6 pour le seuil VCN3 et le seuil simple, ils sont multipliés en moyenne par 1.3 dans le cas du travail sur les débits influencés.

La comparaison des volumes de déficit déterminés sur les débits influencés à ceux calculés pour les débits naturels permet, pour chaque période, de déterminer la part du déficit liée aux prélèvements. Ainsi, nous pouvons établir qu'au présent, le volume déficitaire lié aux prélèvements est de l'ordre de 0.73 Mm³ pour le seuil simple par rapport à un déficit total de 0,77 Mm³, contre 2.5 Mm³ pour le seuil VCN3 par rapport à un déficit total de 3.79 Mm³. Le déficit imputable aux prélèvements est donc plus important pour le seuil simple (95%) que pour le seuil VCN3 (65%). De la même manière, dans le futur, à

court terme, le volume déficitaire lié aux prélèvements serait de 1.0 Mm³ pour le seuil simple (soit 93% du déficit total), contre 3.3 Mm³ (soit 62% du déficit total) pour le seuil VCN3 ; et à long terme, de 1.7 Mm³ pour le seuil simple (88% du déficit total), contre 4.8 Mm³ pour le seuil VCN3 (57% du déficit total). La part du déficit liée aux prélèvements est donc importante pour ce sous bassin versant, et notamment lorsque l'on considère le seuil simple. Dans le futur, cette part du déficit en eau diminue, l'impact du climat devenant plus marqué ; cela est mis en évidence de manière plus flagrante par le seuil de type VCN3. Le fait de travailler sur les débits influencés permet de définir les volumes de déficits qu'il faudrait par exemple compenser pour conserver un certain débit seuil dans le cours d'eau. Ainsi, nous pouvons remarquer que, alors qu'en prenant comme référence le seuil simple, il serait possible de combler les dépassements à hauteur de presque à 100% en jouant sur les usages (restrictions, transferts, etc.) ; avec un DOE de type VCN3, il resterait structurellement toujours 35% du déficit (nécessitant de mobiliser de nouvelles ressources pour être comblé...).

Analyse sur le Tech aval :

Tableau 14 : Fréquences de dépassement et volumes moyens "annuels" de déficit en eau par rapport aux deux DOE, pour chacune des 3 périodes (présente et futures), à Argelès. Calculs effectués sur les débits naturels (a.), et sur les débits influencés par les prélèvements actuels (b.).

| a. Analyse sur les débits naturels | | 1980-2000 | 2020-2040 | 2040-2060 |
|---|------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Seuil VCN3 Tretour 8 ans | F dépassement (%) | 15.0 % | 23.9 % | 33.9 % |
| | V déficit (Mm ³) | 0.83 | 1.33 | 2.62 |
| Seuil simple | F dépassement (%) | 1.82 | 2.95 | 6.36 |
| | V déficit (Mm ³) | 0.04 | 0.06 | 0.16 |
| b. Analyse sur les débits influencés | | 1980-2000 | 2020-2040 | 2040-2060 |
| Seuil VCN3 Tretour 8 ans | F dépassement (%) | 48.0 % | 58.6 % | 65.7 % |
| | V déficit (Mm ³) | 7.94 | 10.01 | 13.07 |
| Seuil simple | F dépassement (%) | 30.7 % | 33.0 % | 38.6 % |
| | V déficit (Mm ³) | 5.10 | 6.24 | 7.88 |

Nous notons en premier lieu que les fréquences de dépassement ainsi que les volumes de déficit associés sont de manière générale du même ordre de grandeur à Argelès-sur-Mer qu'à Reynès, et ce quels que soient le seuil ou la période considérée, lorsque l'on considère les débits naturels (Tableau 14.a). Il ressort cependant que les volumes de déficit sont moindres à Argelès qu'à Reynès sur la période 2040-2060, malgré des fréquences de défaillance identiques. Ce constat pourrait souligner un éventuel soutien assuré par la nappe alluviale dans le sous bassin versant d'Argelès : la nappe tamponnerait dans le futur la baisse de débit à Argelès par rapport à Reynès.

Lorsque l'on s'intéresse aux débits influencés, en revanche, les fréquences de dépassement ainsi que les volumes de déficit associés sont de manière générale très supérieurs à Argelès par rapport à Reynès. Cette différence importante est donc liée pour sa majeure partie à la différence de prélèvements entre les deux sous bassins versants (les prélèvements sont beaucoup plus importants dans le sous bassin aval - §2.1.2.4). Ainsi, nous pouvons établir qu'au présent, le volume déficitaire lié aux prélèvements est de l'ordre de 5.0 Mm³ pour le seuil simple (soit 99% du déficit total), contre 7.1 Mm³ pour le seuil VCN3 (soit 89% du déficit total). Dans le futur, à court terme, ce volume serait de 6.2 Mm³ pour le seuil simple (99% du déficit total), contre 8.7 Mm³ pour le seuil VCN3 (87% du déficit total); et à long terme, de 7.7 Mm³ pour le seuil simple (98% du déficit total), contre 10.5 Mm³ pour le seuil VCN3 (80% du déficit total). La part du déficit liée aux prélèvements est donc très marquée pour ce sous bassin versant (plus qu'en amont), et notamment lorsque l'on considère le seuil simple. Dans le futur, cette part du déficit

en eau diminue, l'impact du climat devenant plus marqué ; cela est mis en évidence de manière plus flagrante par le seuil de type VCN3.

En outre, à Argelès-sur-Mer (Tableau 14), le constat concernant la différence de retranscription de l'impact du changement climatique permise par chacun des deux seuils est le même qu'à Reynès. Nous notons également que le taux d'augmentation des fréquences de dépassement des seuils et des volumes déficitaires associés est moins marqué lorsque l'on travaille sur les débits influencés que lorsque l'on considère les débits naturels, de la même façon qu'en amont. L'évolution du climat impacte donc plus le respect des DOE que la prise en compte des prélèvements considérés comme constants dans le futur.

Après avoir déterminé un impact de l'évolution du climat sur la susceptibilité du bassin versant à dépasser les seuils critiques de débit du Tech, nous allons déterminer l'impact de l'évolution des prélèvements sur la situation future du bassin versant considéré.

4.2.2. Impact de l'évolution des prélèvements sur la situation future

Nous voulons déterminer l'impact de l'évolution des prélèvements (selon les différents scénarios imaginés pour le futur) sur la fréquence de dépassement et sur les volumes de déficits annuels moyens correspondant, pour la période future 2020-2040. Seul cette période est analysée pour cette question, car la prospective n'a été réalisée qu'à cet horizon.

Pour ce faire, nous retranchons les débits de prélèvements futurs (selon les 6 scénarios présentés au §4.1) et présent (témoin), aux débits naturalisés de la période 2020-2040, et calculons ensuite nos fréquences de dépassement par rapport aux deux DOE choisis, ainsi que les volumes de déficit associés. Les résultats de cette étude sont présentés dans le Tableau 15, ci dessous.

Tableau 15 : Fréquences de dépassement et volumes moyens "annuels" de déficit en eau, selon les scénarios de prélèvements futurs considérés («Plvt A-F»), sur la période 2020-2040, (et comparaison au scénario présent : «Plvt prés»), par rapport aux deux DOE – à Reynès et à Argelès :

| REYNES | | Plvt A | Plvt B | Plvt C | Plvt D | Plvt E | Plvt F | Plvt prés |
|----------------------------|------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-----------|
| Seuil VCN3 Tretour 8ans | F dépassement (%) | 36.8% | 37.3% | 35.5% | 35.5% | 35.7% | 35.9% | 37.5% |
| | V déficit (Mm ³) | 5.25 | 5.31 | 4.90 | 4.96 | 4.99 | 5.05 | 5.37 |
| Seuil simple | F dépassement (%) | 13.2% | 13.6% | 12.1% | 12.1% | 12.1% | 12.1% | 13.9% |
| | V déficit (Mm ³) | 0.98 | 1.01 | 0.85 | 0.88 | 0.89 | 0.91 | 1.04 |

| ARGELES | | Plvt A | Plvt B | Plvt C | Plvt D | Plvt E | Plvt F | Plvt prés |
|----------------------------|------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-----------|
| Seuil VCN3 Tretour 8ans | F dépassement (%) | 60.2% | 62.7% | 58.9% | 60.9% | 59.6% | 61.6% | 58.6% |
| | V déficit (Mm ³) | 10.79 | 12.45 | 10.15 | 11.78 | 10.48 | 12.13 | 10.01 |
| Seuil simple | F dépassement (%) | 34.6% | 38.0% | 33.0% | 37.3% | 34.3% | 37.3% | 33.0% |
| | V déficit (Mm ³) | 6.69 | 7.83 | 6.28 | 7.38 | 6.49 | 7.61 | 6.24 |

Au vu des résultats repris dans le Tableau 15, il ressort tout d'abord que l'impact de l'évolution des prélèvements se traduit à Reynès par une baisse de la fréquence de dépassement des DOE et des volumes de déficits correspondants, tandis que l'effet inverse est prédit à Argelès, quels que soient les scénarios considérés. Ce constat est à relier à l'évolution des prélèvements estimée sur ces deux sous

bassins versants (§4.1.3, Figure 34), la tendance étant à la diminution en amont du bassin versant, et à l'augmentation dans le sous bassin versant aval, à l'horizon 2020-2040.

Par ailleurs, nous remarquons que la différence d'impact sur les fréquences de dépassement et sur les volumes déficitaires est peu marquée selon les scénarios d'évolution des besoins en eau futurs considérés, pour le sous-bassin amont, quel que soit le seuil considéré (Tableau 15.a). En revanche, à Argelès, trois scénarios (B, D et F) se dégagent comme étant plus impactant vis-à-vis de l'évolution de ces indicateurs de vulnérabilité, et ce pour nos deux seuils : les volumes de déficit pour ces scénarios sont plus élevés de l'ordre de 20% par rapport aux autres scénarios (c'est-à-dire d'un ordre de grandeur de 2 Mm³, ce qui n'est pas négligeable pour un tel bassin versant). Ces scénarios correspondent à ceux prévoyant une augmentation plus nette des prélèvements, en période estivale, à l'horizon 2020-2040 (§4.1.3, Figure 34). Ces 3 scénarios sont établis à partir d'un même scénario d'usage agricole (Agriculture régionale et Haute Protection Environnementale - 3/4).

Ainsi, cette analyse des impacts de l'évolution des prélèvements sur la ressource en eau, selon différents scénarios, permet de constater qu'à Argelès, l'un des scénarios agricoles est moins souhaitable que l'autre vis-à-vis de la protection de la ressource en eau (le scénario Agriculture régionale et HPE). En revanche, malgré le caractère très contrasté des scénarios établis, aucun d'entre eux ne se démarque comme étant plus souhaitable que les autres, à Reynès.

4.3. DISCUSSION ET PERSPECTIVES

Globalement, il est possible de conclure que quels que soient les scénarios, et quel que soit le seuil choisi, il apparaît que l'impact de l'évolution des prélèvements est peu significatif sur le bassin versant du Tech, bien qu'il soit cependant un peu plus marqué dans le sous bassin versant aval. L'impact de l'évolution du climat est donc bien plus marqué que celui lié à l'évolution des prélèvements. A court terme, le climat reste le plus influent. Après une analyse plus fine, il est important de noter que malgré la prépondérance du facteur climat sur l'évolution de la vulnérabilité du territoire aux changements globaux vis-à-vis de la ressource en eau pour le bassin versant du Tech, les choix de développement d'ordre socio-économique peuvent tout de même être impactant. En effet, même si leur impact est moindre, les choix opérés conditionnent tout de même la qualité de la protection de la ressource en eau, et notamment les choix opérés au niveau de l'évolution agricole et des usages de l'eau en découlant. Il semble important que des efforts soient consentis pour évoluer dans le sens de la protection de la ressource en eau, bien que l'impact de ces choix d'ordre socio-économique puisse paraître moindre au regard de l'impact du climat sur cette même ressource. Il est cependant important de noter que dans notre cas d'étude, le scénario qui préserverait mieux la ressource en eau n'est pas un scénario souhaité par la profession agricole (§4.1.2).

L'étude de comparaison entre deux seuils nous permet de souligner le fait que le choix du seuil est hautement stratégique, et prend même des dimensions d'ordre politique. En effet, la différence entre les volumes de déficits mis en évidence pour chacun des seuils choisis peut être importante, et de l'ordre de grandeur du volume d'eau « récupérable » par la construction d'un barrage, par exemple. Selon le seuil choisi, les mesures à mettre en œuvre pour compenser les déficits en eau peuvent être de natures très variables. En effet, dans notre cas, en considérant un DOE tel que notre seuil simple, des mesures de restriction d'eau pourraient suffire à pallier au déficit en eau prévu pour le futur, à l'horizon 2020. En revanche, si un DOE plus contraignant, du type de notre seuil VCN3, était choisi, des mesures

de restriction d'eau ne suffiraient pas à combler le déficit volumique prévu, et l'on devrait y adjoindre des mesures de soutien d'étiage, nécessitant de mobiliser de nouvelles ressources.

Il est important de noter que les résultats obtenus découlent d'une démarche dans laquelle les incertitudes sont nombreuses, et se cumulent à chaque étape. Il serait important de mener une analyse de sensibilité des résultats aux différents paramètres en prenant en compte les transferts d'incertitudes, pour appréhender la fiabilité des résultats obtenus. Une telle démarche d'évaluation des incertitudes liées à l'approche adoptée représente cependant un travail considérable.

L'étude de vulnérabilité que nous avons élaborée (§4.) se base sur des scénarios d'évolution des prélèvements en eau dans le futur qui sont critiquables. Les scénarios agricoles sont en effet caricaturaux de par leur construction, ce qui permet essentiellement d'explorer les possibles et de faire discuter les acteurs sur les solutions qui pourraient mener à certains aspects souhaitables des scénarios ou au contraire à éviter d'autres aspects des scénarios non souhaitables. Les facteurs à prendre en compte concernant l'évolution agricole sont très nombreux, et se déclinent à différentes échelles. L'élaboration de prévisions est donc complexe, et soumise à des incertitudes importantes.

Cette étude de vulnérabilité repose sur le choix de nos deux indicateurs, dont la définition aurait pu être différente (l'étude du VCN30 à la place du VCN3, par exemple, ...). Mais cela nous a permis de comparer l'effet de deux seuils contrastés concernant le niveau de contrainte imposé et la complexité de l'indicateur lui-même. En outre, ces choix se justifient dans la perspective d'une présentation des résultats obtenus aux gestionnaires du territoire. Il pourrait cependant être intéressant de comparer les résultats obtenus suite au choix d'un troisième type d'indicateur.

La vulnérabilité d'un système est souvent définie par l'exposition du système à l'aléa que l'on étudie, sa sensibilité à cet aléa, et sa capacité d'adaptation. Après avoir étudié dans un premier temps l'exposition de notre système aux conditions climatiques et socioéconomiques futures, et après avoir mené une analyse de la vulnérabilité de ce système à ces aléas futurs, il serait donc intéressant de s'intéresser aux capacités d'adaptation potentielles de ce système face à cet aléa. Ainsi, l'étape suivante serait d'explorer les solutions qui pourraient être mises en œuvre pour éviter ou réduire les déficits en eau.

En effet, nous avons déterminé les déficits en eau présent et futurs, si l'on cherche à respecter les DOE fixés, étant donné l'évolution tendancielle des consommations (§4.2.1, 4.2.2). L'étape suivante qui permettrait de mener la démarche à son terme, consisterait à proposer différentes mesures qui permettraient de réduire le déficit en eau mis en évidence. Les mesures envisageables à l'échelle du bassin versant peuvent concerner la réduction de la demande en eau potable, la gestion des besoins agricoles, ou encore la mobilisation de nouvelles ressources. Selon les volumes déficitaires à compenser, différents scénarios de retour à l'équilibre pourraient être proposés.

Parmi les grandes solutions de mobilisation de nouvelles ressources envisageables dans la région étudiée, nous noterons la possibilité de la mise en œuvre d'une déviation permettant d'acheminer de l'eau du Rhône, la mise en place d'usines de dessalement de l'eau de mer, la construction de barrages... Des études d'évaluations financières prospectives ont été menées afin de déterminer quelles solutions seraient les plus avantageuses, selon les cas. Il est important de noter que selon l'évolution du coût de l'énergie par exemple, les rentabilités de chacune des méthodes proposées pourraient se trouver inversées. En effet, si le coût de l'électricité augmentait sensiblement, il ne deviendrait plus rentable de mettre en place des usines de dessalement de l'eau de mer, cette technique demandant un fort apport énergétique (à moins que les technologies de dessalement évoluent d'ici là). Il est donc relativement difficile de prévoir sur le long terme, étant donné la multiplicité des paramètres entrant en jeu, et la complexité des interactions entre ceux-ci.

CONCLUSION

La démarche de modélisation mise en place dans le bassin versant du Tech nous a permis de mettre en évidence un comportement différent des zones amont et aval : des relations nappe-rivière ainsi qu'une sous-estimation des prélèvements opérés ont été révélées dans la zone aval.

Au vu de nos simulations, le changement climatique devrait avoir un impact sur les débits futurs du Tech dès le court terme (significatif en période estivale), qui devrait se renforcer à plus long terme, devenant significatif sur une plus large période de l'année. Nous avons également pu montrer que la présence de la nappe alluviale permettrait de limiter l'impact du changement climatique en surface sur le sous bassin versant aval, en jouant un rôle tampon. Il est important de noter que les incertitudes liées à toute cette étude sont grandes, et n'ont pu être estimées.

L'étude de vulnérabilité du territoire aux changements climatiques et socio-économique a montré un impact futur bien plus marqué à moyen terme qu'à court terme. Selon cette étude, l'impact lié à l'évolution climatique serait prépondérant par rapport à celui en lien avec l'évolution socio-économique. Le choix du seuil défini comme DOE détermine grandement les conclusions apportées à ce type d'études. Ce choix est donc hautement stratégique, et prend même des dimensions d'ordre politique. Les volumes de déficit en eau à prévoir dans le futur ont été estimés par rapport à deux seuils, et il serait intéressant de réfléchir plus concrètement aux solutions à apporter à de tels déficits. Les résultats de cette étude seront présentés aux gestionnaires du territoire, qui pourront faire leurs choix et décider des mesures à mettre en œuvre afin de permettre au territoire de se prémunir au mieux des évolutions futures, vis-à-vis de cette ressource en eau.

La démarche présentée dans ce rapport a été élaborée afin d'étudier l'impact des changements globaux sur la ressource en eau dans le bassin versant du Tech, mais se replace dans un contexte plus large visant à étudier ces impacts à l'échelle des Pyrénées Orientales, territoire dont les caractéristiques sont représentatives de la zone méditerranéenne. Dans ce cadre, le bassin versant du Tech constitue un cas d'étude intéressant, mais il se démarque par son caractère peu anthropisé. Il serait donc enrichissant de mettre en application la démarche établie dans ce contexte-ci, sur une autre zone d'étude plus anthropisée. Le bassin versant de la Têt, adjacent à celui du Tech, présente cette caractéristique d'anthropisation plus marquée, et des problèmes liés à la ressource en eau et à sa gestion se font déjà ressentir, dans ce secteur. Il serait donc enrichissant d'appliquer la méthodologie établie sur notre cas d'étude au bassin versant de la Têt, et d'en comparer les résultats.

REMERCIEMENTS

Je tiens en premier lieu à remercier Yvan Caballero, qui m'a permis de réaliser ce stage et m'a suivi avec intérêt tout au long de celui-ci.

Un grand merci à Bernard Ladouche, toujours très disponible, qui m'a aidé à mettre en place toute la démarche de modélisation sur le bassin versant étudié, et m'a permis d'approfondir ma maîtrise du logiciel de modélisation hydrologique Tempo. J'adresse mes remerciements à Laure Maton avec qui j'ai eu la chance de pouvoir échanger pour l'étude de vulnérabilité du territoire. Merci à Perrine Fleury, qui m'a initiée aux logiciels de modélisation Vensim et Tempo, m'a transmis les résultats de ses premières réflexions sur le sujet et m'a suivie dans le début de mon stage. Merci à Nicolas Vigaud qui avec qui j'ai notamment pu échanger à propos des études statistiques de mes résultats.

Je remercie également Isabelle Terrasson et Sébastien Chazot du bureau d'étude BRLi, qui nous ont transmis les données d'évaluation des débits de prélèvements sur la zone d'étude.

J'adresse des remerciements plus généraux à toute l'équipe du BRGM de Montpellier, au sein de laquelle ce fut un plaisir de travailler, dans une ambiance très conviviale. Une mention spéciale aux stagiaires et intérimaires pour les bons moments passés ensemble, et à Anne-Laurence Agenais et Emilie Tirard qui ont partagé mon bureau dans la bonne humeur.

GLOSSAIRE

Bassin versant : ensemble d'un territoire drainé par un cours d'eau et ses affluents. Délimité par des lignes de crête, ses eaux alimentent un exutoire commun.

Débit : Volume d'eau qui traverse une section transversale d'un cours d'eau par unité de temps (m^3/s)

Débit annuel : moyenne des 12 débits mensuels de l'année civile.

Débit mensuel : moyenne des débits moyens journaliers du mois calendaire.

Débit mensuel interannuel : moyenne arithmétique de tous les débits moyens mensuels pour un mois donné, au cours de la période des relevés.

Débit moyen journalier : rapport entre le volume écoulé durant une journée complète, et la durée correspondante

Débit naturel : débit qui serait observé en absence d'ouvrage hydraulique modifiant le régime du cours d'eau au niveau de la station.

Débit d'Objectif d'Etiage (DOE) : Le DOE est censé permettre un équilibre entre l'ensemble des usages de l'eau et le bon fonctionnement de l'écosystème. Selon son niveau, il peut cependant représenter un choix stratégique visant à privilégier un ou des usages jugés prioritaires ou au contraire, à privilégier des fonctionnalités du milieu aquatique au détriment de certains usages (un DOE faible a tendance à favoriser les fonctionnalités du milieu aquatique par rapport à un DOE élevé, et inversement).

Débit spécifique : débit par unité de superficie de bassin versant exprimé généralement en Litre/seconde/km². Permet la comparaison entre des cours d'eau sur des bassins versants différents.

Etiage : période de basses eaux.

Evapotranspiration : quantité d'eau totale transférée du sol vers l'atmosphère par l'évaporation au niveau du sol et par la transpiration des végétaux. L'ETP est soit mesurée, soit calculée à partir de diverses données météorologiques (vitesse du vent, hygrométrie, température, etc.)

Fréquence (au dépassement) d'un événement : probabilité que cet événement soit atteint ou dépassé chaque année.

Inféoflux : Ecoulement par des alluvions perméables sous le lit d'une rivière.

Lit mineur : espace fluvial, formé d'un chenal unique ou de chenaux multiples et de bancs de sables ou galets, recouvert par les eaux coulant à pleins bords avant débordement.

Loi de Maillet : La loi de Maillet permet de décrire l'équation du tarissement^(*) : $Qt = Q_0 \times e^{-\alpha t}$, α désignant le coefficient de tarissement (de Maillet), et Q_0 désignant le débit initial de la phase de tarissement (Lang & Gille, 2006).

Modèle hydrologique : en hydrologie, un modèle est la plupart du temps une représentation mathématique d'un bassin, d'un système d'eau, d'une série de données...

Module : Débit moyen annuel.

Période de retour : correspond à une évaluation de l'intervalle de temps entre les événements d'une certaine intensité ou taille. C'est une mesure statistique dénotant de l'intervalle moyen de répétition sur une période prolongée. La période de retour est l'inverse de la probabilité d'occurrence de l'événement considéré au cours d'une année quelconque.

Plaine alluviale : unité géographique qui représente la basse plaine d'un cours d'eau, caractérisée par des pentes faibles et des zones inondables généralement étendues.

Pliocène : désigne la dernière période de l'ère tertiaire.

Recalibrage : action qui consiste à modifier l'axe et la capacité d'écoulement d'un cours d'eau afin d'éviter les débordements.

Ripisylve : désigne les formations végétales qui croissent le long des cours d'eau.

Station hydrométrique : section d'un cours d'eau instrumentée où l'on mesure la hauteur et détermine le débit, à partir d'un ensemble d'équipements et notamment une échelle limnimétrique (permettant une observation des hauteurs), un ensemble de capteurs de mesure et éventuellement du matériel de télétransmission des données.

Tarissement : décroissance du débit d'une source en régime non influencé, liée à la baisse des niveaux et à la diminution de réserve en période sans alimentation du réservoir, ou décroissance de l'écoulement souterrain d'un cours d'eau, dans les mêmes conditions. Elle est figurée par la courbe de tarissement.

Tarissement d'une nappe : décroissance du débit d'eau souterraine allant aux eaux de surface pendant les périodes sans alimentation, due à la diminution de la réserve d'eau souterraine et exprimée par la courbe de tarissement. (CNSFH, 2010)

VCNn : Débit moyen minimal annuel calculé sur n jours consécutifs.

Le **VCN3** permet de caractériser une situation d'étiage sévère sur une courte période.

A partir d'un échantillon de valeurs d'un paramètre (ex. VCN3), on calcule, pour certaines périodes de retour, les valeurs statistiques du dit paramètre.

LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES

AEP : Alimentation en Eau Potable

BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières

BRLi : Bas Rhône Languedoc ingénierie

CERFACS : Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique

CMIP3 : Coupled Model Intercomparison Project

DOE : Débit d'Objectif d'Etiage

ETP : EvapoTranspiration Potentielle

GCMs : General Circulation Models

GIEC : Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat

LEMA : Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques

PCMDI : Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison

RMSE : Root Mean Square Error

RVE : Relative Volume Error

SRES : Special Report on Emission Scenarios

VULCAIN : "VULnerability of hydrosystems to combined effect of Climate Changes and human Activities In Mediterranean area" (Vulnérabilité des hydrosystèmes soumis au Changement Global en zone Méditerranéenne)

WCRP : World Climate Research Program

BIBLIOGRAPHIE

ADES. (2010). Retrieved from <http://www.ades.eaufrance.fr>

Banque Hydro. (2010). Retrieved from <http://www.hydro.eaufrance.fr/>

Boé, J., & al. (2009). Projected changes in components of the hydrological cycle in French river basins during the 21st century. *Water Resour. Res.* , 45,W08426, doi:10.1029/2008WR007437.

Booij, M. J. (2005). Impact of climate change on river flooding assessed with different spatial model resolutions. *Journal of Hydrology* 303 , 176-198.

Caballero, Y., & al. (2007). Hydrological sensitivity of the Adour-Garonne river basin to climate change. *Water Resour. Res.* , 43, W07448, doi:10.1029/2005WR004192.

Chaouche, K., & al. (2010). Analyses of precipitation, temperature and evapotranspiration in a French Mediterranean region in the context of climate change. *Surface geosciences (Hydrology-Hydrogeology)* .

CNSFH. (2010). Retrieved from Dictionnaire Français d'Hydrologie: <http://webworld.unesco.org/water/ihp/db/glossary/glu/indexdic.htm#T>

Cras, A., & al. (2007). Hydrological behaviour of sub-Mediterranean alpine headwater streams in a badlands environment. *Journal of hydrology* , 134-135.

DREAL Nord-Pas de Calais. (2010). *Bulletin de Situation Hydrologique - Bassin Artois-Picardie*. Préfecture de la région Nord-Pas de Calais, MEEDDM.

Eau France. (2010). Retrieved from <http://www.eaufrance.fr>

Eaucéa. (2007). *Plan de Gestion des Etiages - Bassin versant de l'Ardèche (tomes 1 et 2)*.

Etchevers, P., & al. (2002). Impact of a climate change on the Rhône River catchment hydrology. *J. Geophys. Res.* , 107(D16), 4293, doi:10.1029/2001JD000490.

Hingray, B., Picouet, C., & Musy, A. (2009). *Hydrologie - 2. Une science pour l'ingénieur*. Presses polytechniques et universitaires romandes, ingénierie de l'environnement.

Houghton, J., & al. (2001). *Climate Change 2001 : The Scientific Basis*. Cambridge, U.K.: Cambridge Univ. Press.

Infoterre. (2010). Retrieved from <http://infoterre.brgm.fr>

Lang, C., & Gille, E. (2006). Une méthode d'analyse du tarissement des cours d'eau pour la prévision des débits d'étiage. *Norais*, 201| 2006/4 [en ligne] <http://norais.revues.org/index1743.html> .

Musy, A., & Higy, C. (2004). *Hydrologie - 1. Une science de la nature*. Presses polytechniques et universitaires romandes.

Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models,, . *J. Hydrol.*,10(3) , 282-290.

PCMDI. (2010). Retrieved from <http://www-pcmdi.llnl.gov/>

Pinault, J. L. (2001). Manuel utilisateur de TEMPO : logiciel de traitement et de modélisation des séries temporelles en hydrogéologie et en hydrogéochimie. Projet ModHydro. *Rapport BRGM/RP 51459-FR*, 233.

Poux. (2006). *Agriculture, environnement et territoires. Quatre scénarios à l'horizon 2025*. Ministère de l'écologie, Ministère de l'Agriculture.

Préfecture des Pyrénées Orientales. (2007). *Arrêté cadre n° 993/2007 définissant les modes de gestion d'une sécheresse pour le département des Pyrénées Orientales*.

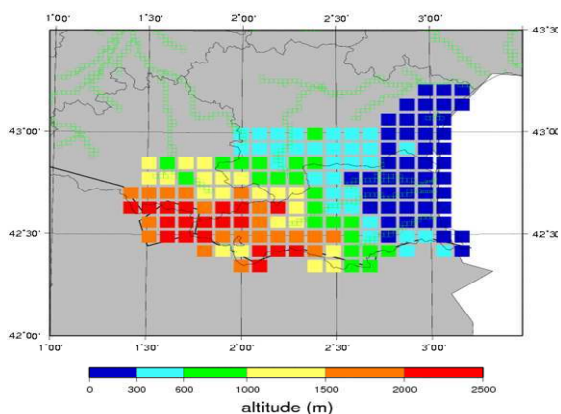
(2006). *Rapport final du projet GICC-MEDWATER IPSL*. Impacts du changement climatique sur le cycle hydrologique du bassin méditerranéen.

SIEE. (2006). *Atlas des zones inondables du bassin versant du Tech par la méthode hydrogéomorphologique*.

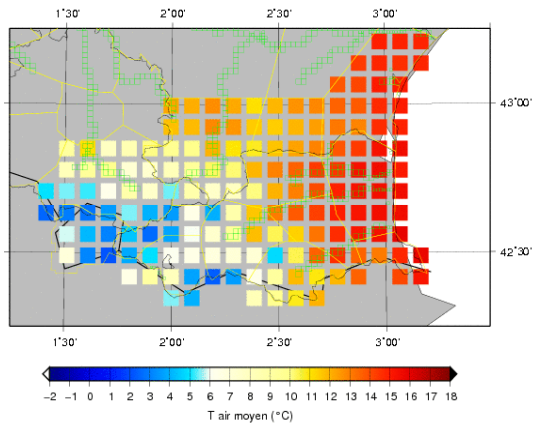
SIVU. (2010). *La Vallée du Tech, pour une gestion équilibrée de l'eau*. Retrieved from <http://www.vallee-du-tech.com>

Trenberth, K. E., & al. (2007). Surface and Atmospheric Climate Change. *Climate Change 2007 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York.

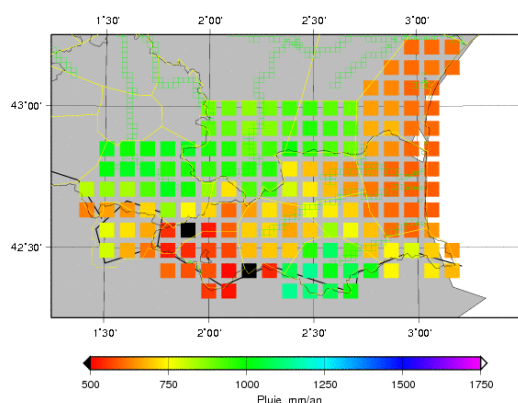
Annexe 1 : Présentation des résultats de données climatiques sur les 35 dernières années (1970-2006) issus des calculs de Météo France, et présentés sur la grille SAFRAN, sur notre zone d'étude : le département de Pyrénées Orientales.



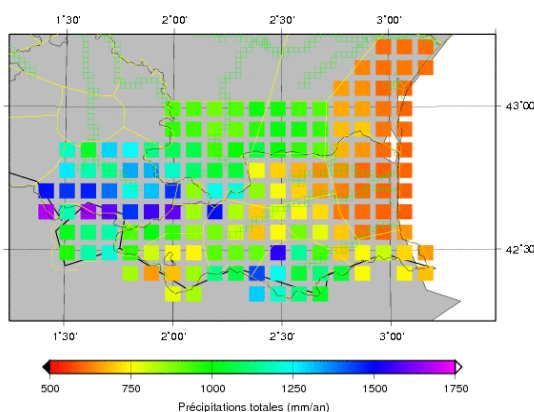
a. Altitude du zonage à 8 km de résolution



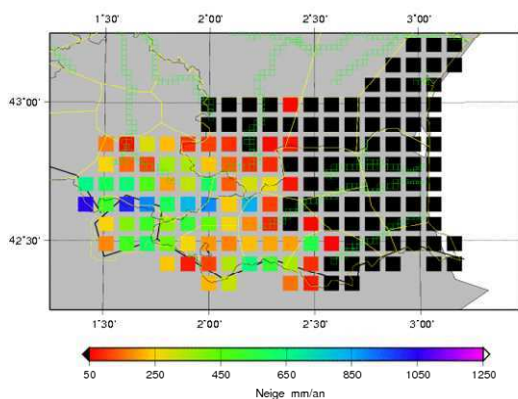
b. Température moyenne annuelle (1970-2006)



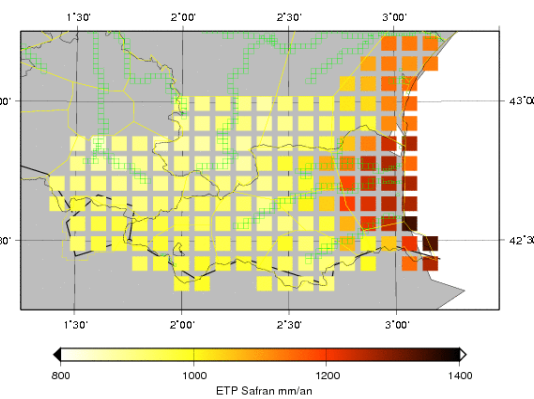
c. Pluie moyenne annuelle (1970-2006)



d. Précipitations totales moyennes (1970-2006)



e. Chutes de neige moyennes annuelles (1970-2006)



f. ETP moyenne annuelles (1970-2006)

Annexe 2 : Présentation plus détaillée de la méthode de calcul des prélèvements pour l'alimentation en eau potable, mise en place par BRLi.

Les besoins pour l'alimentation en eau potable sont calculés selon la formule suivante :

$$\text{Besoins annuels (année n)} = \frac{\text{ratio de consommation (année réf)} \times \text{population équivalente (année n)}}{\text{« rendement » (année n)}}$$

Détaillons les différents termes :

- Le ratio de consommation est la consommation moyenne d'un équivalent.habitant sur la zone considérée. Il est calculé comme suit, sur la base des dernières données de distribution disponible :

$$\text{ratio de consommation (année réf.)} = \frac{\text{volume facturé (année réf.)}}{\text{population équivalente (année réf.)}}$$

Ce ratio est la division du volume annuel total facturé sur un réseau (observation pour une année récente) par le nombre d'habitants équivalents sur l'année desservis par ce réseau. Ce ratio intègre donc en pratique les trois grands types d'usagers clients des réseaux publics d'alimentation en eau potable : domestiques, industriels et utilisations publiques.

Dans tous les cas, ces ratios restent entachés d'imprécisions dans la mesure où la population équivalente est souvent difficile à estimer.

- La population équivalente correspond à la population totale (participant à la consommation d'eau) lissée sur l'année. En supposant que la population saisonnière est présente deux mois, on a :

$$\text{population équivalente} = \text{population permanente} + (2/12) \cdot \text{population saisonnière}$$

- Le rendement correspond au ratio, sur un réseau donné, du volume facturé sur le volume prélevé :

$$\text{rendement} = \frac{\text{volume compté aux points de distribution}}{\text{volume prélevé}}$$

Ce rapport n'est pas à proprement parler un rendement physique. La différence entre volume compté aux points de distribution et volume prélevé représente les pertes physiques du réseau mais également l'ensemble des volumes échappant au comptage (volume servant au nettoyage des rues, bornes incendies, ...).

Ces calculs ont été réalisés en se basant sur des données d'archives de différentes communautés de communes ou entreprises sous-traitantes (Veolia, SAUR...), chargées de l'alimentation en eau potable des communes de la zone d'étude, mais également sur des données recueillies au niveau de l'Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse.

Le pas de temps annuel n'est pas assez fin pour examiner l'impact des prélèvements sur la ressource en eau. Aussi, la reconstitution des prélèvements par forage a été menée au pas de temps mensuel.

Annexe 3 : Présentation plus détaillée de la méthode de calcul des prélèvements pour l'irrigation (usage agricole), mise en place par le bureau d'études BRLi.

Dans cette estimation, sont distingués :

Le prélèvement brut : quantité totale prélevée dans le milieu

Le prélèvement net : part du prélèvement qui ne retourne pas au milieu. Il est calculé en déduisant du prélèvement brut la quantité d'eau qui retourne au milieu (retours en fin de canaux, infiltrations, retours des stations d'épuration, ...).

La première notion est fondamentale pour analyser les détournements de flux opérés sur les tronçons de cours d'eau. La seconde est opportune pour l'analyse du bilan global en eau à l'échelle de bassins versants, dans la mesure où les retours des préleveurs amont se retrouvent disponibles pour les préleveurs aval.

Modèle de prélèvements et de demandes en eau agricole

Un modèle des prélèvements et des demandes en eau agricole au pas de temps mensuel a été construit dans le cadre du projet. Son objectif est de déterminer, pour chaque sous bassin versant du Tech, les prélèvements, bruts et nets, actuels et futurs possibles (demandes potentielles). Il met en parallèle un calcul agro-climatique théorique des besoins en eau des plantes et un calcul des prélèvements nets et bruts dans le milieu naturel. Cette double approche permet d'appréhender la part de la demande liée au climat et aux choix cultureux et d'autre part la part de la demande liée aux modes d'adduction et d'irrigation et à la gestion des systèmes.

Calcul des besoins en eau théorique des plantes

Le calcul agro-climatique du besoin en eau des plantes est conduit par la méthode des coefficients cultureux sur la base des données climatiques SAFRAN (voir 0).

Pertes

Les prélèvements brut sont soit connus directement soit, en l'absence de mesures, estimés. Le besoin des plantes est soustrait au prélèvement brut selon la formule de bilan suivante :

$$\text{Prélèvement brut} = \text{besoins des plantes} + \text{« pertes »}$$

Selon le mode d'adduction à l'amont des parcelles et le mode d'irrigation à la parcelle, on devra distinguer plusieurs composante pour le terme « pertes », comme illustré sur les schémas ci-dessous :

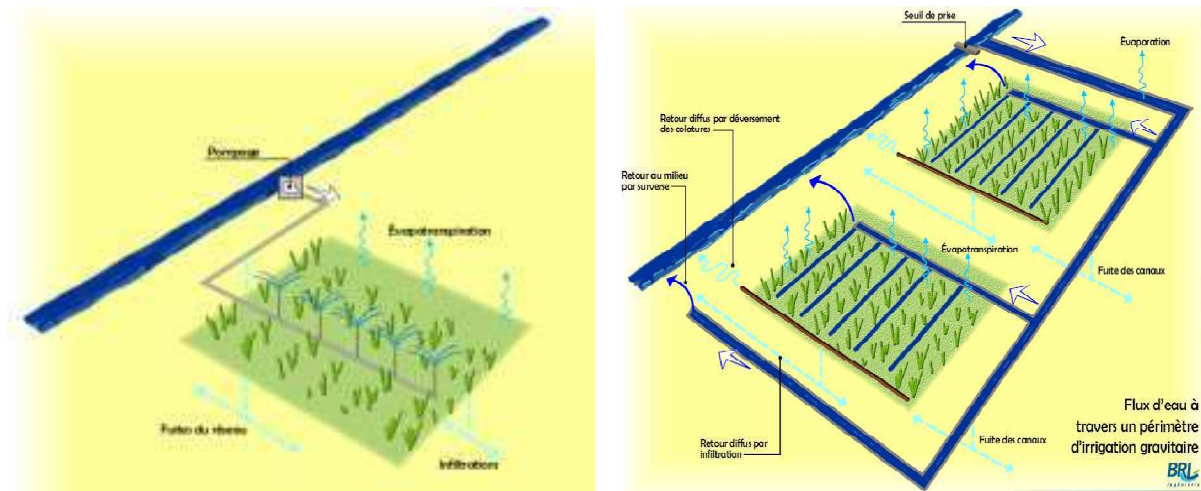


Figure : 1. Pertes dans le cas d'une adduction par conduite et d'une irrigation à la parcelle par aspersion - 2. Pertes dans le cas d'une adduction et d'une irrigation à la parcelle gravitaire

Les pertes par évaporation en surface des canaux gravitaires ou sur les surfaces sans culture recevant de l'eau ne vont pas retourner au milieu. Le reste de l'eau non consommée n'est pas « réellement perdu » : il retourne au milieu.

Ce retour se fait :

- soit dans un cours d'eau :
 - retours directs : extrémité de canal d'adduction, extrémité de colature,
 - retours indirects : retour diffus superficiels par déversement des colatures, retours diffus par écoulement hypodermique, ...
- soit dans un aquifère : infiltrations rejoignant un aquifère, qui peut éventuellement alimenter un cours d'eau à son tour.

L'estimation de ces phénomènes dans le modèle se fait à **dire d'expert** :

- On introduit en premier lieu un coefficient qui traduit le fait que toutes les pertes ne retournent pas au milieu. Cette « surconsommation » est estimée dans un premier temps à 25% des besoins en eau des cultures dans le cas des canaux gravitaires et à 10% pour les systèmes sous pression plus économes ;
- **On définit ensuite, pour chaque système d'irrigation, la part des retours vers chacun des sous-bassins versants en fonction de la localisation des périmètres irrigués dans les bassins.**

Méthode de calcul des prélèvements nets par sous-bassin :

Par la suite, nous distinguerons donc :

- les **besoins en eau théoriques des cultures**, calculés à partir du modèle agro-climatique à l'échelle des zones climatiques,
- les **besoins nets**, qui tiennent compte de l'assolement et de l'efficacité des modes d'irrigation,
- les **prélèvements bruts** qui sont les prélèvements effectués dans les cours d'eau,

- les **prélèvements nets**, calculés à l'échelle des sous-bassins, qui correspondent aux prélèvements bruts auxquels on a retranché les pertes qui retournent au milieu dans le sous-bassin considéré, et dont le mode de calcul est décrit ci-dessous.

Pour chaque périmètre, les **retours au milieu** sont calculés par la formule suivante :

$$R_k = Pbrut_k - Bnets_k, \text{ où}$$

- R_k est le retour au milieu du périmètre k
- $Pbrut_k$ est le prélèvement brut total réalisé pour le périmètre k
- $Bnet_k$ sont les besoins nets obtenus par le calcul pour le périmètre irrigué k .

Le **retour total** au milieu est réparti entre les sous-bassins situés en aval de la prise. Cette répartition est réalisée **à dire d'experts** sur la base de la cartographie des canaux et périmètres irrigués réalisée dans le cadre de VULCAIN. On en déduit alors les $R_{k \rightarrow i}$ (retours du périmètre k dans le sous-bassin i).

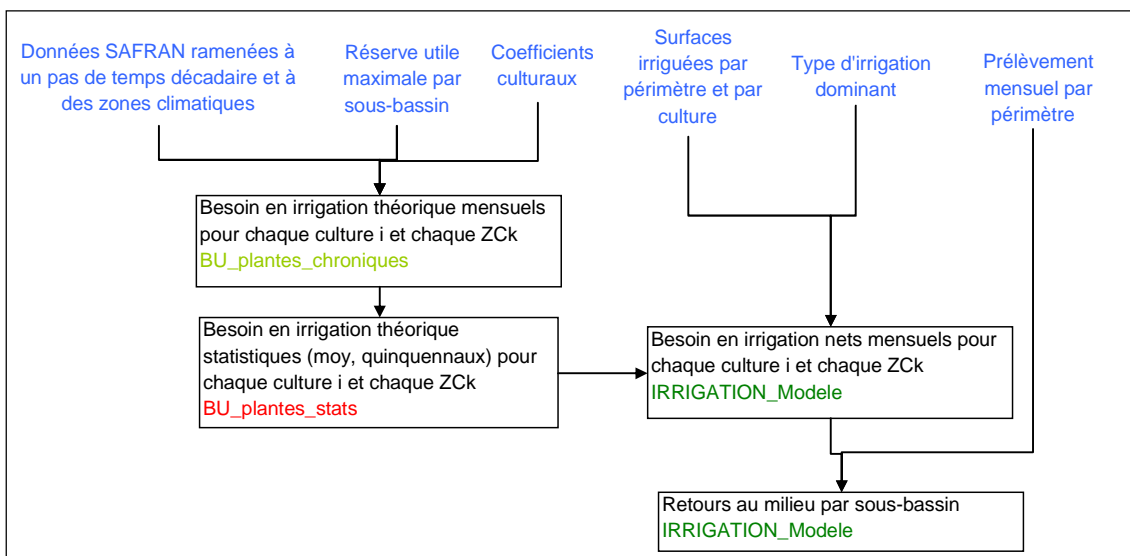
A l'échelle des sous-bassins, on a donc :

$$Pbrut_{bas\ sin\ i} = \sum_{prisek \in bas\ sin\ i} Pbruts_k \quad \text{et} \quad R_{bas\ sin\ j \rightarrow bas\ sin\ i} = \sum_{prisek \in bas\ sin\ j} R_{k \rightarrow i}$$

On en déduit alors le **prélèvement net** du bassin i :

$$Pnet_{bas\ sin\ i} = \sum_{prisek \in bas\ sin\ i} Pbruts_k - \sum_{j=1}^i R_{bas\ sin\ j \rightarrow bas\ sin\ i}$$

Le schéma ci-dessous présente les étapes du calcul des besoins en eau agricoles.



Besoins en eau théoriques des cultures

Méthode

Ce calcul est conduit au pas de temps décadaire sur la période de référence climatique du projet : 1971-2005, selon la formule suivante :

Besoin théorique unitaire mensuel en irrigation de plante i sur la ZC k (mm) =

$$\sum_j \max [0, (Kc(i, j) \times ETP(k, j) - P(k, j)) - RU(j - 1)], \text{ avec}$$

- RU(j-1) : réserve utile du sol à la fin de la décade j-1 (donc au début de la décade j) (mm),
- ETP (k,j) : évapotranspiration pendant la décade j, sur la zone climatique k (mm)
- P(k,j) : précipitation efficace (*) pendant la décade j, sur la zone climatique k (mm)
- Kc(i,j) : coefficient cultural de la culture i pendant la décade j (fonction du stade de développement de la plante).

(*) en première approximation, on prend la précipitation efficace égale à 80% des pluies.

A chaque pas de temps, la valeur de RU (mm) en fin de décade est mise à jour :

$$RU(j) = \max [0 ; RU(j-1) + P(j) - Kc(i,j) \times ETP(j)]$$

La valeur de la réserve des sols de la fin d'une année n est reportée au début de l'année n+1 (modèle continu).

Remarque importante : le calcul de besoin en eau est réalisé pour chacune des années 1971 à 2005 et non pour les valeurs climatiques statistiques pouvant être calculées sur cette période.

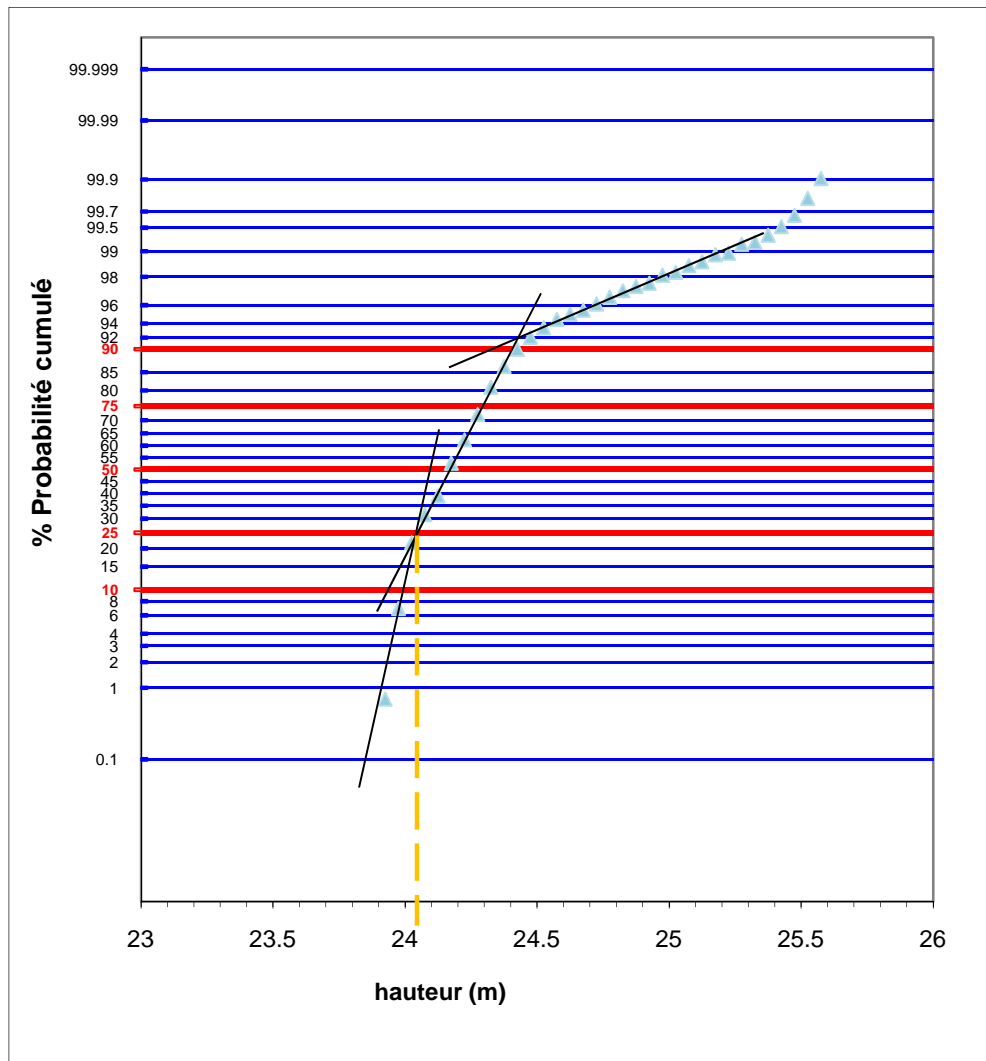
Les besoins théoriques par périmètre irrigué sont obtenus en sommant les besoins unitaires de chaque culture et de la surface cultivée pour chaque type de culture :

Besoin théorique sur un périmètre irrigué de la ZCk (m3)

$$= \sum_i S_i \times \text{Besoins théoriques en irrigation des cultures i dans la ZC}_k$$

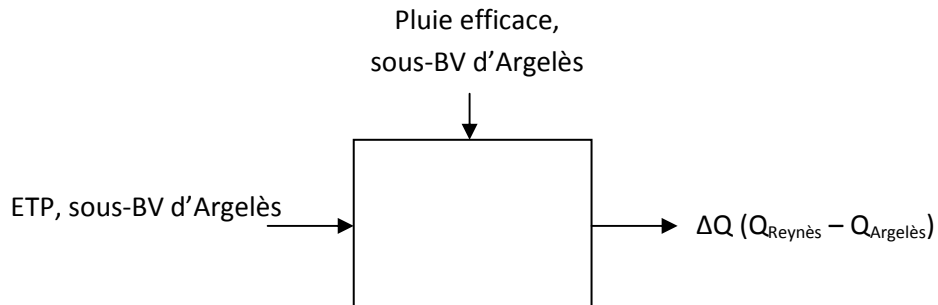
Les besoins nets (m³) sont alors obtenus en multipliant ces besoins théoriques par un coefficient qui permet de tenir compte des pertes dues au mode d'irrigation.

Annexe 4 : Résultat de la méthode des débits classés, appliquée au niveau piézométrique d'Ortaffa. Ce graphique nous permet de mettre en évidence un point d'inflexion vers 24 mètres NBF, traduisant une modification du comportement hydrodynamique du système, à partir de ce seuil, en période d'étiage.



Annexe 5: Présentation des différentes étapes de modélisation ayant conduit à la renaturalisation du débit à la station d'Argelès.

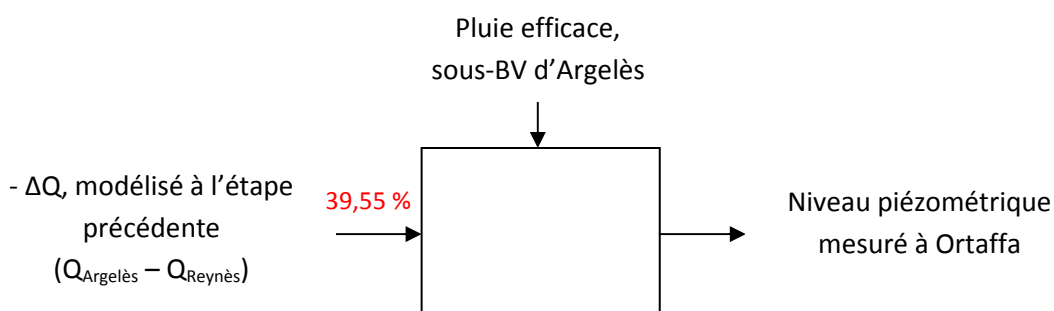
Etape 1 : Méthode permettant de modéliser le ΔQ (différence de débits observés entre les stations d'Argelès et de Reynès), à partir des données de pluviométrie sur le sous bassin versant d'Argelès.



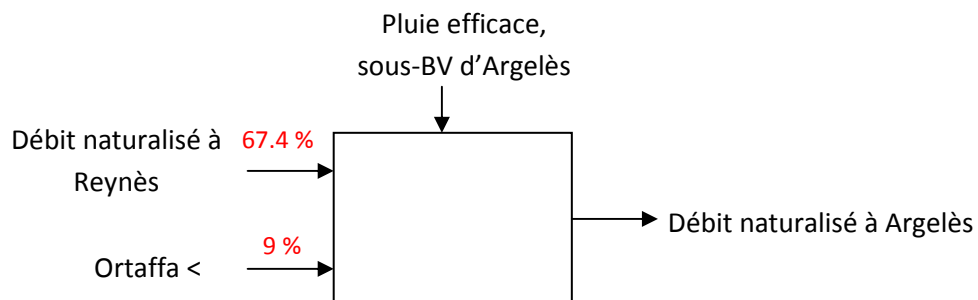
Afin de caler cette méthode de transfert, nous avons travaillé avec, en sortie, un ΔQ calculé à partir de chroniques de débits mesurés à Reynès et à Argelès lissées sur 10 jours (filtre de moyenne mobile centrée, sur 10 jours).

La mise en œuvre de cette méthode nous permet d'obtenir un ΔQ potentiellement définissable pour chaque période où une chronique de pluviométrie est établie pour le sous bassin versant d'Argelès. Cela permet d'être indépendants des périodes de définition des données de prélèvements, qui sont peu étendues. (En effet, sans la mise en place de cette méthode de transfert, pour calculer le ΔQ , il nous fallait déterminer des chroniques observées à Reynès et à Argelès, ce qui nécessitait la mise en place de méthodes de transfert introduisant en entrée une contribution du signal lié aux débits de prélèvements. Cela limitait donc les périodes sur lesquelles nous pouvions déterminer cette variable ΔQ)

Etape 2 : Méthode permettant de modéliser la chronique piézométrique à Ortaffa. Cette méthode de transfert a pour but de relier la chronique de différence de débit entre Reynès et Argelès (ΔQ) et les précipitations sur le sous-bassin versant d'Argelès, à la chronique de piézométrie observée à la station de mesure Ortaffa.



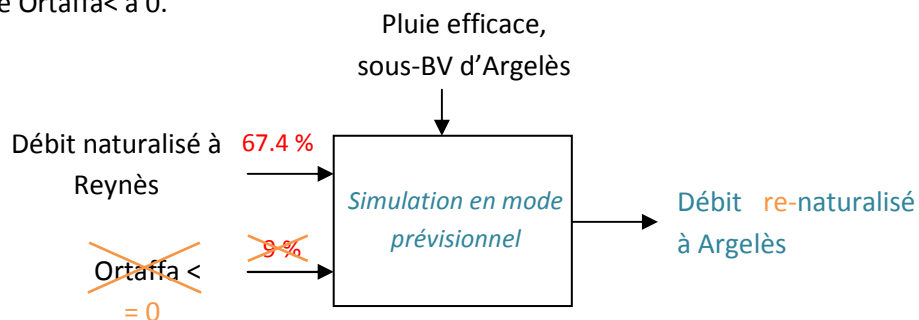
Etape 3 : L'étape suivante consiste à relier ce niveau piézométrique à Ortaffa, ainsi que la pluviométrie sur le sous bassin versant d'Argelès et le débit naturalisé issu de la station de Reynès (située en amont), au débit naturalisé à Argelès :



Cette démarche permet de reproduire le débit naturalisé à Argelès, en prenant comme données d'entrée les pluies sur le sous bassin versant d'Argelès, le débit naturalisé arrivant du sous bassin versant amont (Reynès), et intégrant les relations entre nappe et rivière.

Etape 4 : Méthode de « renaturalisation » des débits à Argelès :

Afin de corriger le débit imputé à la chronique de débits à Argelès lié au ΔQ , nous effectuons une simulation à l'aide de la méthode de transfert définie à l'Etape 3, en mettant la contribution de la composante Ortaffa < à 0.



Cette technique nous permet d'extraire un débit « renaturalisé » à Argelès, qui inclut la prise en compte des prélèvements supplémentaires.

Annexe 6 : Tableaux de bilans hydriques calculés sur les sous bassins versant de Reynès et d'Argelès, au présent et au futur (comparaison des 3 périodes de 20 années)

REYNES :

1980-2000 (moyennes annuelles) :

| | Σ Précipitations (mm) | Σ Pluie (mm) | Σ Neige (mm) | Qnat simulé Tempo (mm) |
|-------------------------|------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| Moyenne annuelle | 1178.20 | 1035.44 88.1% | 142.76 11.9% | 48.83 4.1% |

2020-2040 (moyennes annuelles) :

| Scénario | Σ Précipitations (mm) | Σ Pluie (mm) | Σ Neige (mm) | Qnat simulé Tempo (mm) |
|-------------------|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| CNRM | 1080.79 | 979.37 90.6% | 101.42 9.4% | 40.91 3.8% |
| HADC | 1097.85 | 1001.82 91.3% | 96.03 8.8% | 46.01 4.2% |
| IPSL | 1227.38 | 1113.67 90.7% | 113.71 9.3% | 51.29 4.2% |
| MPIM | 1150.67 | 1024.78 89.1% | 125.88 10.9% | 47.21 4.1% |
| NCAR | 1100.65 | 1022.86 92.9% | 77.79 7.1% | 37.68 3.4% |
| Moyenne | 1131.47 | 1028.50 90.9% | 102.97 9.1% | 44.62 3.9% |
| <i>Ecart type</i> | 59.62 | 51.05 | 18.20 | 5.36 |

2040-2060 (moyennes annuelles) :

| Scénario | Σ Précipitations (mm) | Σ Pluie (mm) | Σ Neige (mm) | Qnat simulé Tempo (mm) |
|-------------------|------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| CNRM | 946.98 | 886.83 93.7% | 60.15 6.4% | 33.51 3.5% |
| HADC | 945.32 | 873.99 92.5% | 71.33 7.6% | 40.29 4.3% |
| IPSL | 1131.14 | 1046.93 92.6% | 84.21 7.4% | 45.26 4.0% |
| MPIM | 950.45 | 876.33 92.2% | 74.13 7.8% | 35.18 3.7% |
| NCAR | 1048.07 | 990.14 94.5% | 57.93 5.5% | 36.34 3.5% |
| Moyenne | 1004.39 | 934.84 93.1% | 69.55 6.9% | 38.11 3.8% |
| <i>Ecart type</i> | 83.17 | 79.14 | 10.75 | 4.71 |

ARGELES-SUR-MER :

1980-2000 (moyennes annuelles) :

| | Σ Précipitations (mm) | Σ Pluie (mm) | Σ Neige (mm) | Qnat simulé Tempo (mm) |
|-------------------------|------------------------------|------------------------|----------------------|------------------------|
| Moyenne annuelle | 802.36 | 788.35 98.3% | 14.01 1.7% | 105.11 12.7% |

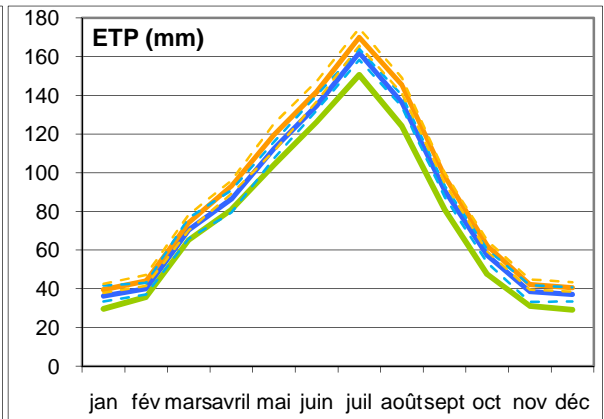
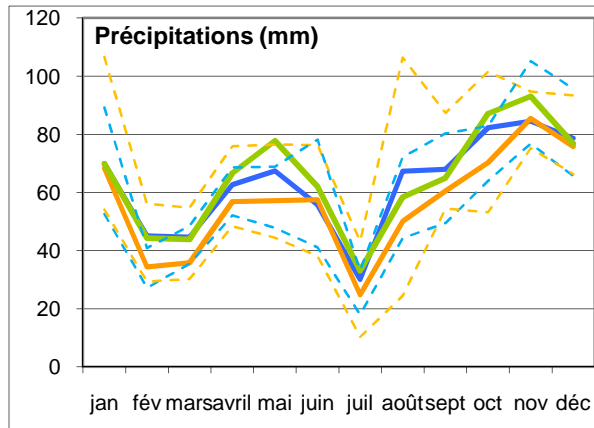
2020-2040 (moyennes annuelles) :

| Modèle | Σ Précipitations (mm) | Σ Pluie (mm) | Σ Neige (mm) | Qmoy nat sim Tempo (mm) |
|-------------------|------------------------------|------------------------|---------------------|-------------------------|
| CNRM | 738.51 | 730.57 98.9% | 7.944381359 1.1% | 93.60 12.7% |
| HADC | 757.43 | 749.82 99.0% | 7.614922017 1.0% | 94.78 12.5% |
| IPSL | 842.66 | 837.11 99.3% | 5.5423066 0.7% | 107.11 12.7% |
| MPIM | 795.36 | 784.80 98.7% | 10.56677943 1.3% | 100.45 12.6% |
| NCAR | 735.13 | 729.92 99.3% | 5.203700617 0.7% | 77.02 10.5% |
| Moyenne | 773.82 | 766.44 99.0% | 7.37 1.0% | 94.59 12.2% |
| <i>Ecart type</i> | 45.32 | 45.35 | 2.16 | 11.19 |

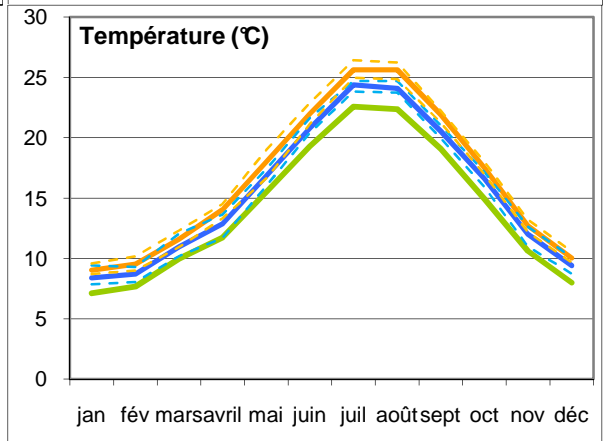
2040-2060 (moyennes mensuelles) :

| Modèle | Σ Précipitations (mm) | Σ Pluie (mm) | Σ Neige (mm) | Qmoy nat sim Tempo (mm) |
|-------------------|------------------------------|------------------------|---------------------|-------------------------|
| CNRM | 642.59 | 639.61 99.5% | 2.99 0.4% | 77.12 12.0% |
| HADC | 661.35 | 656.95 99.3% | 4.40 0.7% | 83.28 12.6% |
| IPSL | 774.95 | 770.78 99.5% | 4.17 0.5% | 91.89 11.9% |
| MPIM | 662.00 | 658.14 99.4% | 3.86 0.6% | 73.35 11.1% |
| NCAR | 706.34 | 704.43 99.7% | 1.91 0.3% | 73.39 10.4% |
| Moyenne | 689.45 | 685.98 99.5% | 3.47 0.5% | 79.81 11.6% |
| <i>Ecart type</i> | 53.23 | 53.15 | 1.02 | 7.88 |

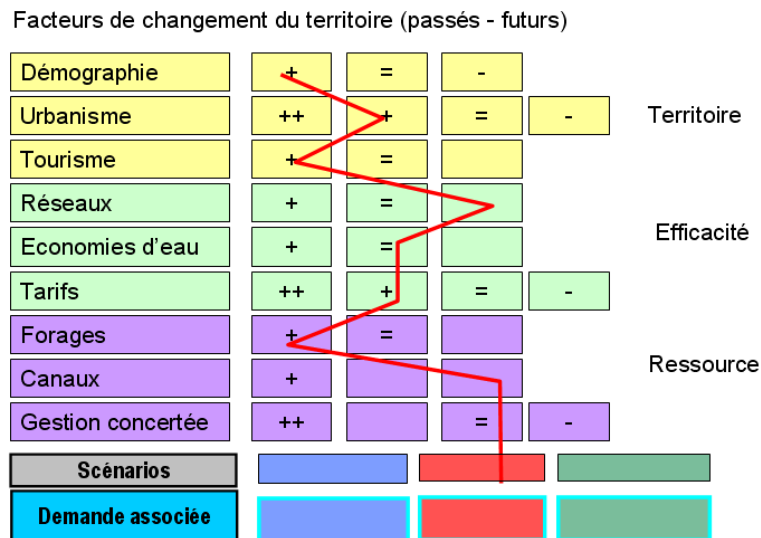
Annexe 7 : Résultat des scénarios climatiques à la station d'Argelès, pour les 3 périodes de vingt années étudiées, et pour les variables climatiques que sont la pluie, la température et l'ETP.



Courbes à enveloppe représentant les moyennes mensuelles de a. Précipitations, b. Température, et c. ETP, sur le sous bassin versant d'Argelès, sur les périodes 1980-2000 (en vert), 2020-2040 (en bleu), et 2040-2060 (en orange). Pour les périodes futures, une enveloppe pour les courbes moyennes est calculée au travers des maxima et des minima mensuels moyens (courbes en pointillés) (permet de représenter la variabilité liée aux modèles climatiques utilisés, pour chaque période).



Annexe 8 : Présentation du type de calculs effectués afin d'établir la demande future en eau potable à partir des tendances affectées à chaque facteur de changement, pour chaque acteur participant à l'atelier de réflexion.

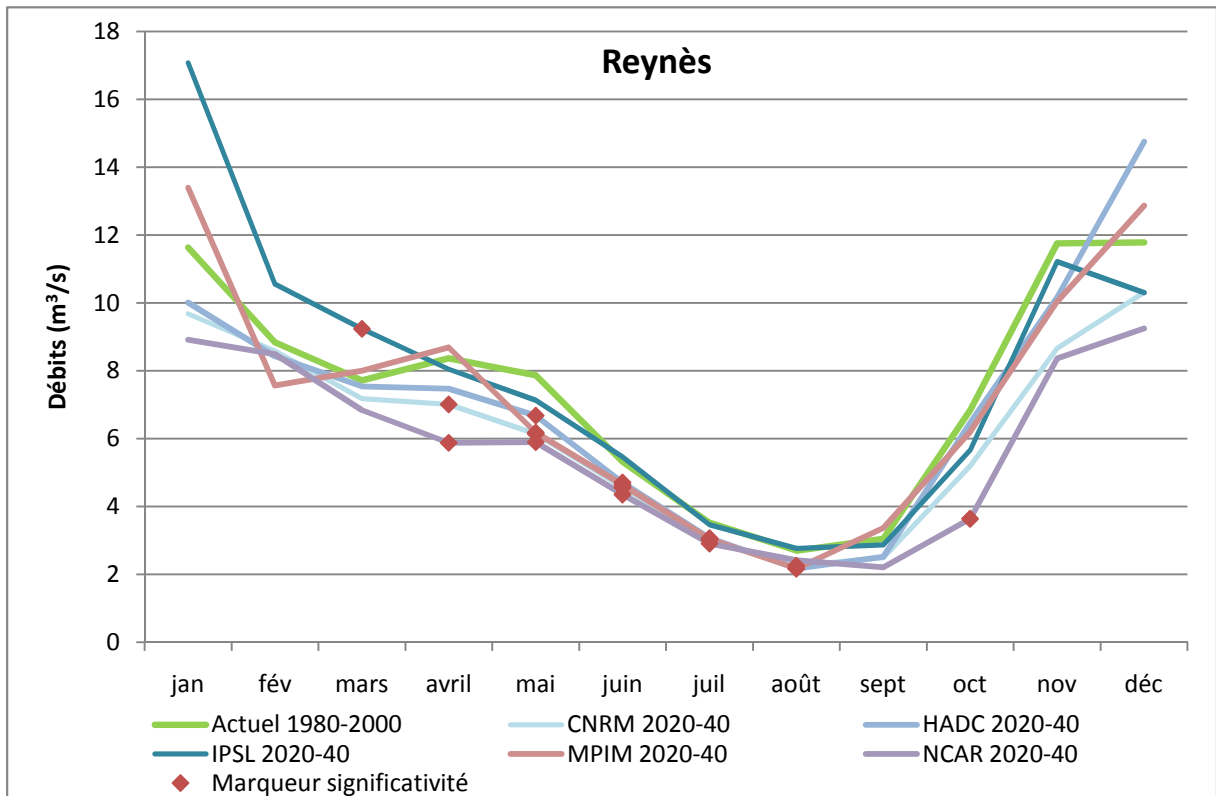


Annexe 9 : Représentation graphique des résultats de tests de significativité, menés entre les débits simulés pour chaque scénario climatique pour les deux périodes futures et les débits simulés pour la période présente, à Reynès, et à Argelès-sur-Mer.

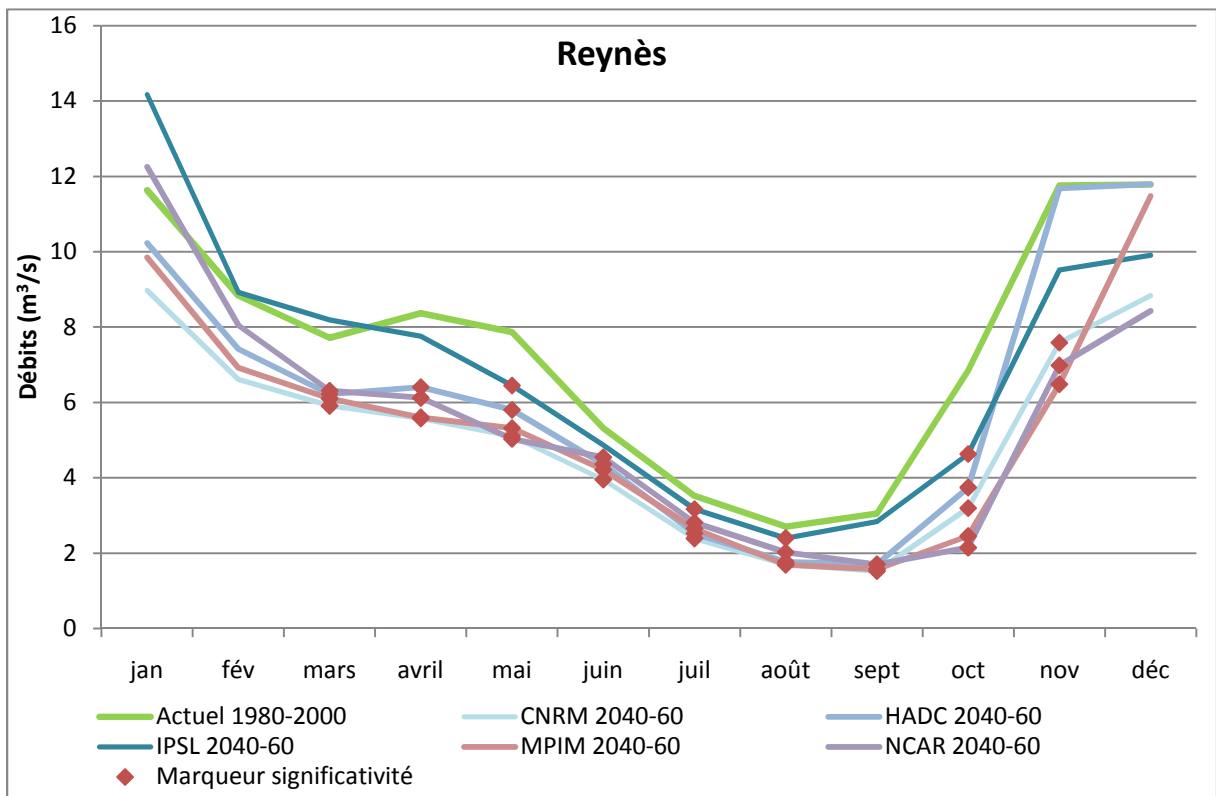
Présentation des tests statistiques menés sous R, et démarche d'analyse des résultats obtenus :

- **Test de Fisher** : pour tester l'égalité de deux variances.
 - Interprétation des résultats obtenus sous R :
 - Si **Pvalue<0.05** : le test est significatif, ce qui signifie que l'on rejette H0, qui fait le postulat de l'égalité des variances. On rejette donc au seuil alpha=5% l'hypothèse que les variances sont égales.
 - Si **Pvalue>0.05** : le test n'est pas significatif, et alors on admet H0, soit l'hypothèse d'égalité des variances entre les deux échantillons considérés.
- **Test de Student** : pour tester l'égalité de deux moyennes.
 - Interprétation des résultats obtenus sous R :
 - Si **Pvalue<0.05** : le test est significatif, ce qui signifie que l'on rejette H0, qui fait le postulat de l'égalité des moyennes. On peut donc en conclure que nos échantillons ont des moyennes significativement différentes (au seuil alpha=5%).
 - Si **Pvalue>0.05** : le test n'est pas significatif, et alors on admet H0, soit l'hypothèse d'égalité des moyennes entre les deux échantillons considérés.

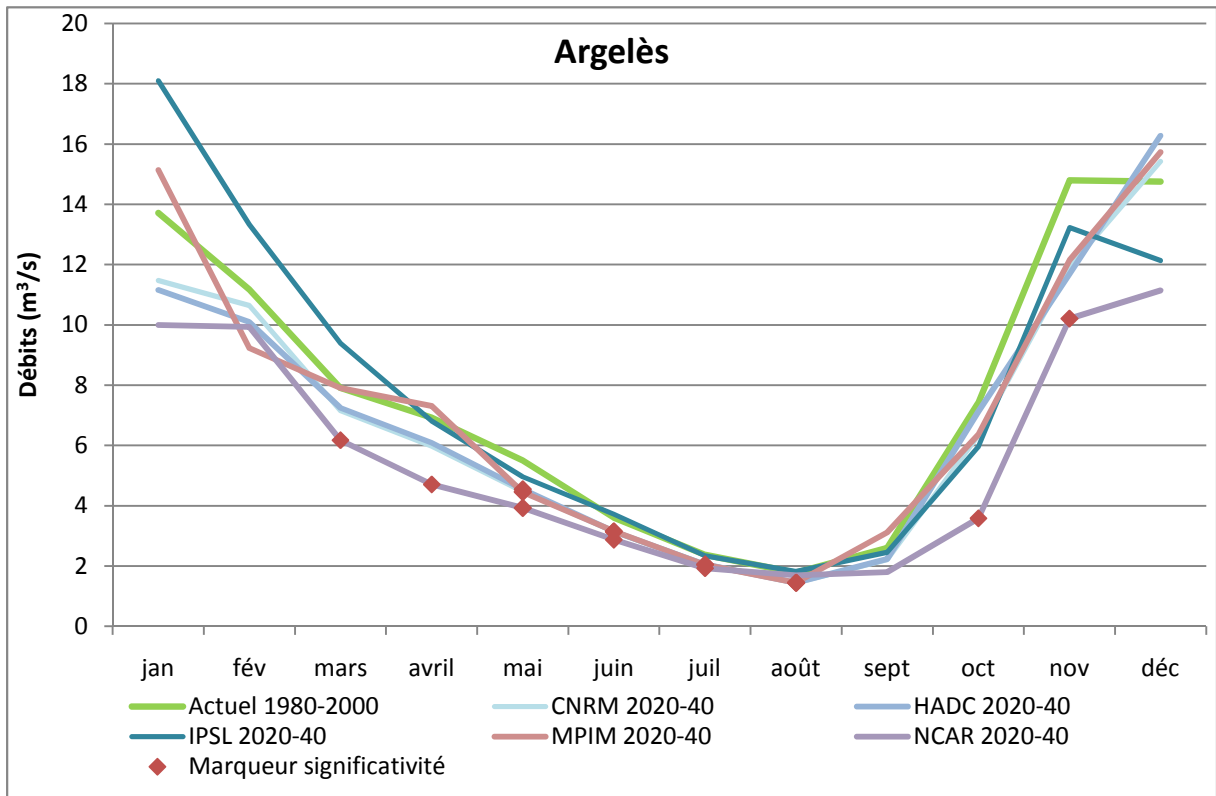
Comparaison entre les débits simulés de la période 2020-2040 et ceux de la période 1980-2000 :



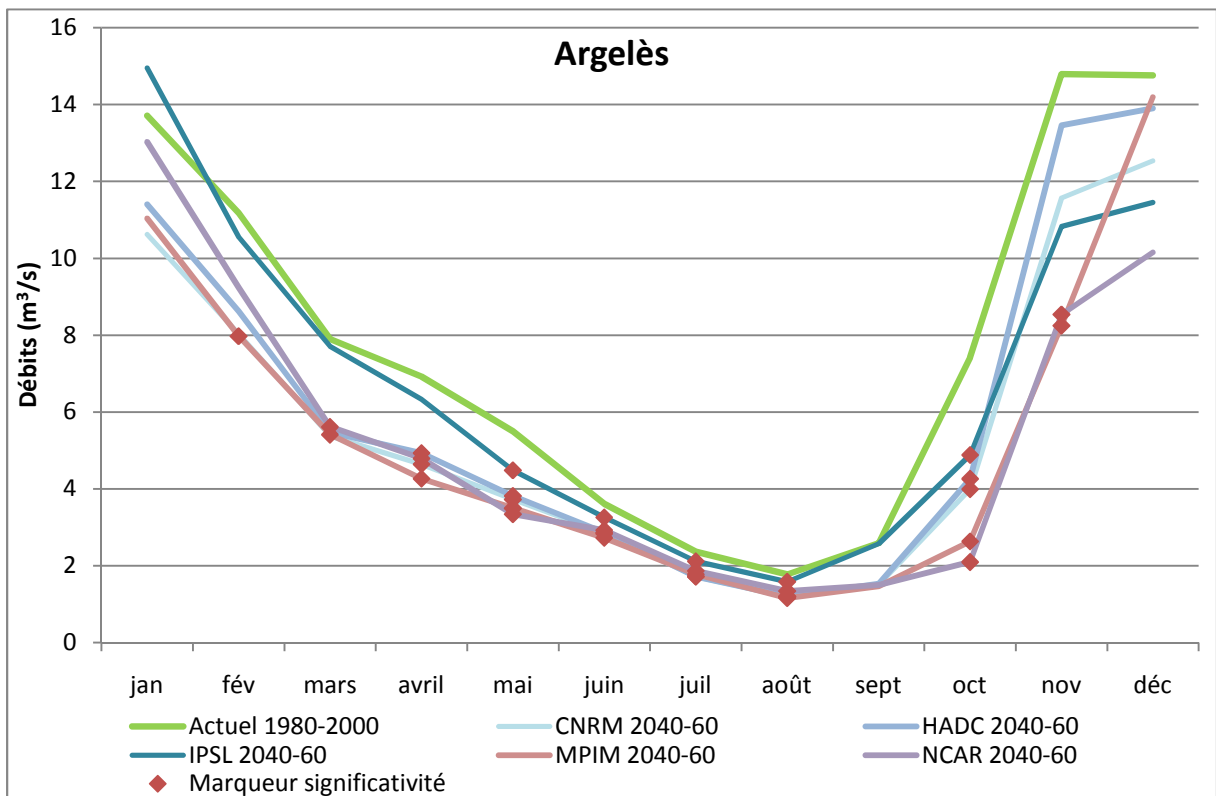
Comparaison entre les débits simulés de la période 2040-2060 et ceux de la période 1980-2000 :



Comparaison entre les débits simulés de la période 2020-2040 et ceux de la période 1980-2000 :



Comparaison entre les débits simulés de la période 2040-2060 et ceux de la période 1980-2000 :



Annexe 10 : Valeurs des Pvalue issues des tests de Student menés dans le but de déterminer la significativité des différences entre les débits modélisés sur les deux périodes de 20 années futurs (2020-2040 et 2040-2060), et sur la période présente (1980-2000). Ces tests ont été réalisés, par mois, pour chaque scénario, puis pour une chronique moyenne des 5 scénarios (résultats représentés en gras).

Reynès :

| Variable 1 | Variable 2 | Jan | Fev | Mars | Avril | Mai | Juin | Juil | Août | Sept | Oct | Nov | Dec |
|--------------------|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| QsimReynat 1980-00 | QsimReynat_CN 2020-40 | 0.3239 | 0.8691 | 0.3356 | 0.0281 | 0.0000 | 0.0016 | 0.0008 | 0.0010 | 0.3114 | 0.1055 | 0.0843 | 0.4650 |
| QsimReynat 1980-00 | QsimReynat_HA 2020-40 | 0.4099 | 0.7711 | 0.7579 | 0.1500 | 0.0018 | 0.0090 | 0.0022 | 0.0000 | 0.3098 | 0.7550 | 0.3917 | 0.2767 |
| QsimReynat 1980-00 | QsimReynat_IP 2020-40 | 0.1121 | 0.3544 | 0.0390 | 0.6645 | 0.0635 | 0.6201 | 0.7348 | 0.6359 | 0.7591 | 0.2569 | 0.8108 | 0.4444 |
| QsimReynat 1980-00 | QsimReynat_MP 2020-40 | 0.4984 | 0.3139 | 0.6413 | 0.6513 | 0.0000 | 0.0032 | 0.0009 | 0.0000 | 0.7161 | 0.5743 | 0.3586 | 0.6467 |
| QsimReynat 1980-00 | QsimReynat_NC 2020-40 | 0.1529 | 0.8136 | 0.1069 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0001 | 0.0528 | 0.0655 | 0.0003 | 0.0669 | 0.1859 |
| QsimReynat 1980-00 | QsimReynat_CN 2040-60 | 0.1688 | 0.0669 | 0.0002 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0010 | 0.0001 | 0.0218 | 0.1221 |
| QsimReynat 1980-00 | QsimReynat_HA 2040-60 | 0.4888 | 0.2657 | 0.0020 | 0.0008 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0050 | 0.0010 | 0.9638 | 0.9882 |
| QsimReynat 1980-00 | QsimReynat_IP 2040-60 | 0.3710 | 0.9626 | 0.4896 | 0.4384 | 0.0002 | 0.0678 | 0.0182 | 0.0192 | 0.7801 | 0.0208 | 0.2592 | 0.3376 |
| QsimReynat 1980-00 | QsimReynat_MP 2040-60 | 0.3860 | 0.1273 | 0.0016 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0016 | 0.0000 | 0.0019 | 0.9021 |
| QsimReynat 1980-00 | QsimReynat_NC 2040-60 | 0.8012 | 0.5863 | 0.0065 | 0.0004 | 0.0000 | 0.0014 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0047 | 0.0000 | 0.0081 | 0.0756 |

| | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|-------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| QsimReynat 1988-00 | QsimReynat_MOY 2020-40 | 0.9351 | 0.9374 | 0.9365 | 0.1396 | 0.0001 | 0.0163 | 0.0040 | 0.0068 | 0.5320 | 0.1723 | 0.2776 | 0.8962 |
| QsimReynat 1980-00 | QsimReynat_MOY 2040-60 | 0.8147 | 0.3512 | 0.0258 | 0.0006 | 0.0000 | 0.0001 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0210 | 0.0001 | 0.0827 | 0.4123 |

Argelès :

| Variable 1 | Variable 2 | Jan | Fev | Mars | Avril | Mai | Juin | Juil | Août | Sept | Oct | Nov | Dec |
|--------------------|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| QsimArgnat 1980-00 | QsimArgnat_CN 2020-40 | 0.2541 | 0.7495 | 0.3533 | 0.1815 | 0.0002 | 0.0005 | 0.0004 | 0.0000 | 0.6538 | 0.3845 | 0.1846 | 0.7838 |
| QsimArgnat 1980-00 | QsimArgnat_HA 2020-40 | 0.1835 | 0.5055 | 0.4360 | 0.2547 | 0.0006 | 0.0008 | 0.0004 | 0.0000 | 0.6684 | 0.8374 | 0.1504 | 0.5630 |
| QsimArgnat 1980-00 | QsimArgnat_IP 2020-40 | 0.1445 | 0.2941 | 0.1350 | 0.8827 | 0.0677 | 0.5384 | 0.8092 | 0.5386 | 0.8866 | 0.2240 | 0.5134 | 0.2003 |
| QsimArgnat 1980-00 | QsimArgnat_MP 2020-40 | 0.5573 | 0.1754 | 0.9891 | 0.6361 | 0.0001 | 0.0009 | 0.0002 | 0.0000 | 0.6416 | 0.4022 | 0.2298 | 0.6933 |
| QsimArgnat 1980-00 | QsimArgnat_NC 2020-40 | 0.0526 | 0.4582 | 0.0213 | 0.0006 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.5044 | 0.2898 | 0.0002 | 0.0337 | 0.0787 |
| QsimArgnat 1980-00 | QsimArgnat_CN 2040-60 | 0.1142 | 0.0289 | 0.0003 | 0.0003 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.1600 | 0.0015 | 0.1660 | 0.3168 |
| QsimArgnat 1980-00 | QsimArgnat_HA 2040-60 | 0.2480 | 0.0844 | 0.0005 | 0.0028 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.1721 | 0.0041 | 0.5904 | 0.7223 |
| QsimArgnat 1980-00 | QsimArgnat_IP 2040-60 | 0.6235 | 0.6899 | 0.8185 | 0.4567 | 0.0005 | 0.0149 | 0.0052 | 0.0106 | 0.9981 | 0.0231 | 0.0749 | 0.1108 |
| QsimArgnat 1980-00 | QsimArgnat_MP 2040-60 | 0.1820 | 0.0263 | 0.0005 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.1498 | 0.0000 | 0.0013 | 0.8215 |
| QsimArgnat 1980-00 | QsimArgnat_NC 2040-60 | 0.7870 | 0.2199 | 0.0013 | 0.0019 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.1658 | 0.0000 | 0.0031 | 0.0238 |

| | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|-------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| QsimArgnat 1988-06 | QsimArgnat_MOY 2022-40 | 0.8113 | 0.7404 | 0.7047 | 0.3128 | 0.0002 | 0.0038 | 0.0011 | 0.0075 | 0.8011 | 0.1987 | 0.1814 | 0.7921 |
| QsimArgnat 1988-06 | QsimArgnat_MOY 2042-60 | 0.4940 | 0.1302 | 0.0064 | 0.0040 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.0000 | 0.2908 | 0.0002 | 0.0558 | 0.2992 |

ABSTRACT

This report presents a study of the impact of climatic and socio-economic driving forces on water resources in the catchment basin of the river Tech, in the Pyrénées Orientales (France). This study was carried out within the framework of the VULCAIN project, set up with the collaboration of BRGM, Meteo France and BRLi. The approach consisted in setting up hydrological models to simulate the flow in the Tech basin at mean (2020-2040) and longer term (2040-2060), and to assess the vulnerability of this basin to both of the climatic and socioeconomic driving forces. To carry out this study, some data on present and future climate (according to 5 scenarios), and an assessment of present and future water withdrawal were used. First, the set up of the model on present data lead us to highlight the particular operating of the downstream sub-basin, because of the presence of a water table in alluvial deposits in this area. This part of the study also revealed that the water withdrawals that were assessed were underestimated, probably because of additional agricultural water withdrawal, that had not been taken into account at first. This study also revealed that, according to our future hydrological simulations, based on 5 climate scenarios established by Meteo France, climate change may have an impact on future flows in the river Tech from the short term (significant during the summer), and that this impact may be reinforced in the longer term, becoming significant for a wider period of time. According to our results, the presence of a water table in the downstream basin may limit the impact of climate change in this area. Besides, the study of the vulnerability carried out showed that the part of the impact ascribed to climate change is dominant, compared to the one ascribed to socioeconomic evolution. The approach highlighted the fact that the threshold that is chosen as a flow value that should not be overstepped during low water periods (DOE) is highly strategic, and depends on political issues. Indeed, the measures that have to be set in order to reduce water deficit can be really different, depending on the threshold chosen.

Mots clé : Hydrology, Modelling, Climate change, Vulnerability.

RESUME

Le présent rapport expose un travail d'étude de l'impact des changements globaux sur la ressource en eau à l'échelle du bassin versant du Tech, situé dans les Pyrénées Orientales. Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet VULCAIN, né de la collaboration entre le BRGM, Météo France et BRLi. La démarche a consisté à mettre en place des modèles permettant de simuler l'évolution des débits dans le bassin versant du Tech à court terme (2020-2040) et à moyen terme (2040-2060). Cette première phase de modélisation hydrologique aux temps présent et futur permet ensuite d'estimer l'impact lié à chacune des deux composantes climatique et socio-économique, puis à étudier la vulnérabilité du territoire face à ces deux grands facteurs de changements. Cette démarche s'est appuyée sur l'utilisation de données concernant le climat actuel et de cinq scénarios de son évolution future (établis par Météo France), ainsi que des données d'estimations des prélèvements présents et futurs selon différents scénarios (établies par BRLi). Dans un premier temps, la mise en place de la modélisation sur le temps présent nous a permis de mettre en évidence un comportement différent dans la partie aval du bassin versant, lié à la présence d'une nappe alluviale à ce niveau. Cette étape a également révélé une sous-estimation des volumes d'eau prélevés dans cette nappe, dont l'origine est probablement agricole. Par ailleurs, les résultats des simulations hydrologiques sur les temps futurs, basées sur les 5 scénarios climatiques, ont montré que le changement climatique devrait avoir un impact sur les débits futurs du Tech dès le court terme (significatif en période estivale), qui devrait se renforcer à plus long terme, devenant significatif sur une plus large période de l'année. Selon nos résultats, la présence d'une nappe alluviale dans le sous bassin versant aval permettrait de limiter l'impact du changement climatique en surface sur cette zone, en jouant un rôle tampon. Par ailleurs, selon les études de vulnérabilité du territoire élaborées, l'impact lié à l'évolution climatique serait prépondérant par rapport à celui en lien avec l'évolution socio-économique, et ce même à court terme. Notre démarche a illustré le fait que le choix du seuil fixé comme Débit d'Objectif d'Etiage est hautement stratégique. En effet, selon le choix opéré, les mesures à mettre en œuvre pour combler les déficits en eau mis en évidence peuvent être de natures très différentes.

Mots clé : Hydrologie, Modélisation, Changements Globaux, Vulnérabilité.