



BRL ingénierie

**1105 Av Pierre Mendès-France BP 94001
30001 NIMES CEDEX 5**

Date de création du document	03/12/2018
Contact	Sebastien.chazot@brl.fr

Titre du document	P10. Rapport sur l'évaluation des externalités et services associés à l'irrigation gravitaire
Référence du document :	
Indice :	V01

Date émission	Indice	Observation	Dressé par	Vérifié et Validé par
03/12/2018	V01		Camille Bosio, Raphaëlle Lavenus	

Mots-clés : eaux souterraines, recharge, prélèvements, évaluation économique, plaine du Roussillon

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Bosio, C. Lavenus, R., (2021) – Evaluation des externalités et services associés à l'irrigation gravitaire. Production #10 du projet Dem'eaux Roussillon, BRGM/RP-71415-FR, 28 p., 1 ann.

P10. RAPPORT SUR L'EVALUATION DES EXTERNALITES ET SERVICES ASSOCIES A L'IRRIGATION GRAVITAIRE

1.	PRESENTATION DE LA PLAINE DU ROUSSILLON ET DE LA PROBLEMATIQUE	4
1.1	Un territoire complexe d'un point de vue hydrologique – liens cours d'eau - canaux - nappes	4
1.2	Des canaux générant des services et externalités multiples	1
	1.2.1 Différences conceptuelles entre service et externalité	1
	1.2.2 Les principales fonctions secondaires des canaux	1
2.	EVALUATION ECONOMIQUE D'UNE EXTERNALITE DES CANAUX : LA RECHARGE DES NAPPES POUR L'AEP	3
2.1	Points méthodologiques	3
	2.1.1 Approche retenue	3
	2.1.2 Données utilisées	3
	2.1.3 Principales hypothèses	6
2.2	Présentation des deux scénarios « contrefactuels »	8
	2.2.1 Scénario 1 : une baisse du niveau des nappes de 1 m/an	8
	2.2.2 Scénario 2 : une baisse du niveau des nappes de 2 m/an	15
2.3	Analyse comparative des scénarios	20
2.4	Analyse de sensibilité	24
3.	CONCLUSION	25
	Annexes	27

1. PRESENTATION DE LA PLAINE DU ROUSSILLON ET DE LA PROBLEMATIQUE

1.1 UN TERRITOIRE COMPLEXE D'UN POINT DE VUE HYDROLOGIQUE – LIENS COURS D'EAU - CANAUX - NAPPES

Depuis le XII^{ème} siècle, de nombreux canaux ont été construits dans la plaine du Roussillon. A l'origine pour le fonctionnement des moulins, ils ont permis le développement de l'agriculture qui est encore aujourd'hui, fortement dépendante des ressources en eau (premier préleveur net au niveau départemental).

Ce maillage de canaux génère une circulation considérable de masses d'eau sur le territoire et complexifie les liens hydro(géo)logiques (relations entre réseau hydrographique, canaux et ressources souterraines). Plusieurs études permettent de mieux comprendre les transferts entre ressources superficielles et ressources souterraines. Les principales avancées en termes de compréhension du système à l'échelle de la plaine du Roussillon sont synthétisées dans le schéma suivant.

Les principales interactions sont les suivantes :

- **Les entrées dans le système** (environ 1 120 Mm³/an) :
 - La pluviométrie apporte environ 500 Mm³/an,
 - Les sources des trois fleuves principaux (la Tech, le Têt, l'Agly) : 620 Mm³/an
- **Les sorties du système** (1 600 Mm³/an):
 - Les « rejets » à la mer : 560 Mm³/an
 - L'évapotranspiration : 960 Mm³/an
 - Les prélèvements dans les nappes : 80 Mm³/an
- **Les transferts intra-système** :
 - La recharge des nappes par les eaux superficielles et canaux : 69 Mm³/an

L'objectif de l'étude économique menée dans le cadre de la Tâche 3 du projet Dem'eaux Roussillon est d'évaluer la valeur de la recharge de la nappe liée à l'irrigation gravitaire pour l'AEP afin de rendre compte de l'importance du rôle des canaux dans la gestion des ressources en eau de la plaine du Roussillon.

Figure 1 : Schéma bilan des flux annuels connus et non connus sur la plaine du Roussillon (données : études volumes prélevables nappe du Roussillon, banque HYDRO et VULCAIN ; schéma BRLi)



1.2 DES CANAUX GENERANT DES SERVICES ET EXTERNALITES MULTIPLES

1.2.1 Différences conceptuelles entre service et externalité

Deux principaux critères permettent de distinguer les services des externalités :

- **Le critère de l'intentionnalité,**
- **Le critère marchand ou non l'interaction,**

On parle d'**externalités** lorsque les actions d'un agent économique ont un impact positif ou négatif sur le bien-être et le comportement d'autres agents sans que cette interaction ne fasse l'objet d'un accord entre eux. Les externalités peuvent se révéler positives ou négatives. Aucune transaction financière entre agents ne rend compte de la valeur de l'externalité.

Au contraire, dans le cas d'un **service**, il y a intentionnalité et, dans beaucoup de cas, transaction financière entre les agents économiques. Un contrat entre vendeur et acheteur précise le détail de la prestation ainsi que son prix.

Une externalité peut être « internalisée », c'est-à-dire reconnue soit comme un service si elle est positive, soit comme un dommage si elle est négative. Elle peut devenir « marchande » si sa valeur économique est reconnue par une transaction financière entre les agents.

Pour reprendre la définition de Hill (1977) : « *Un service est un changement dans la condition d'une personne ou d'un bien appartenant à une unité économique, qui résulte de l'activité d'une autre unité économique, avec l'accord d'une autre unité économique. Si le terme "avec" dans la définition est remplacé par "sans", alors la définition devient celle d'une externalité.* ».

Dans le cas des canaux d'irrigation, les externalités sont principalement la recharge des nappes, l'assainissement pluvial et les aménités paysagères (cf. partie suivante). Ces externalités peuvent être reconnues et alors devenir des services. Par exemple, dans le cas où un gestionnaire d'eau potable demande aux irrigants de laisser un débit minimal dans les canaux afin de recharger une nappe, alors on ne parle plus d'externalité mais de service. Celui-ci peut faire l'objet d'un simple accord oral ou bien d'un contrat plus formel qui prévoit éventuellement un paiement.

1.2.2 Les principales fonctions secondaires des canaux

VISION GENERALE

Les canaux d'irrigation dans la plaine du Roussillon ont peu à peu endossé des rôles autres que ceux pour lesquels ils ont été créés. Leurs fonctions secondaires des canaux sont multiples : la recharge de la nappe, l'assainissement pluvial et la protection contre les inondations, la lutte contre les incendies ainsi que les aménités paysagères.

Ce sont dans la plupart des cas, des externalités positives, c'est-à-dire qu'elles sont exercées de manière non-intentionnelle. Il arrive, cependant, que les acteurs locaux demandent à bénéficier des canaux pour la recharge de la nappe ou pour gérer les risques d'inondation (assainissement pluvial) (Kufuss & Loubier, 2008). Dans ce cas, les fonctions secondaires des canaux deviennent des services (ce ne sont plus des externalités).

Le choix a été fait de se concentrer sur l'externalité « recharge de nappe pour l'eau potable » pour trois raisons principales :

- 1. Il s'agit d'une fonction des canaux bien connue des acteurs locaux,**
- 2. L'alimentation en eau potable est fortement dépendante du niveau des nappes Pliocènes.**
- 3. La données sur les prélèvements AEP sont les informations les plus fiables (par rapport aux autres données prélèvements), nous avons donc préféré réaliser un focus sur cet usage.**

FOCUS SUR LA RECHARGE DES NAPPES POUR L'EAU POTABLE

Observations empiriques

Le lien entre canaux et recharge des nappes est bien connu des acteurs de terrain. Les infiltrations dans les nappes sont estimées être relativement importantes puisqu'en période estivale (irrigation maximale), le niveau piézométrique remonte, malgré une faible pluviométrie. Par ailleurs, les affluents en contact avec la nappe se remettent en eau à cette période. On peut donc établir un lien entre l'activité des canaux et la recharge de l'aquifère.

En outre, une expérimentation de recharge artificielle de la nappe Quaternaire a été menée par le SMNR dans le Boulès en 2016. L'objectif de la démarche était d'évaluer l'impact quantitatif et qualitatif engendré par un lâcher du canal de Perpignan (450 l/s) dans le Boulès sur les nappes du Quaternaire et du Pliocène sur les communes d'Ille Sur Têt, Néfiach, Millas et Saint Féliu d'Amont.

Cette expérimentation a apporté la preuve d'une recharge artificielle possible en pratiquant des décharges dans les cours d'eau à sec. En effet en déchargeant 1,2 Mm³ sur trois mois, le niveau de la nappe du Quaternaire a monté de 3 m et celui de la nappe Pliocène de 1 m (à proximité du point d'injection). La recharge diminue avec la distance au point d'injection, et elle s'étend sur environ 600 m.

En faisant le parallèle avec les canaux et l'irrigation gravitaire, une grande surface sur le territoire pourrait être concernée par la recharge à partir des canaux d'irrigation.

Des préleveurs en demande du service « recharge de nappe »

Il est fréquent que les agriculteurs, les particuliers propriétaires de forages ou les gestionnaires d'eau potable demandent aux ASA d'effectuer des décharges d'eau dans les cours d'eau asséchés, afin de pouvoir exploiter leurs forages.

Des visites des canaux et des entretiens¹ sur le bassin versant de la Têt ont permis d'avoir un retour d'expérience sur le rôle des canaux dans la recharge du Quaternaire. D'après les gestionnaires des canaux, il est fréquent qu'en hiver, certaines communes sollicitent les canaux pour réalimenter leur champ captant. De même, il n'est pas rare que les agriculteurs qui possèdent un forage privé le réalimentent en ouvrant des vannes des canaux dans les secteurs à proximité de leur ouvrage.

Ainsi, sur l'amont du bassin versant de la Têt, à l'aval du barrage de Vinça, la nappe d'accompagnement du Boulès est en partie rechargée par les eaux du canal de Corbère, de Thuir et de Perpignan via des lâchers dans les affluents le Boulès et la Coumelade. Elle alimente la ville d'Ille-sur-Têt et pour partie Perpignan.

¹ (Sandrine Jaffard de l'ACAV, plusieurs garde-vannes, des agriculteurs, Guilhem Gaston-Conduite (ancien responsable du canal de Perpignan))

2. EVALUATION ECONOMIQUE D'UNE EXTERNALITE DES CANAUX : LA RECHARGE DES NAPPES POUR L'AEP

2.1 POINTS METHODOLOGIQUES

2.1.1 Approche retenue

L'objectif de l'exercice est d'approcher la valeur économique de l'externalité « recharge des nappes pour l'eau potable » générée par l'irrigation gravitaire.

Pour ce faire, nous avons considéré des scénarios « contrefactuels » dans lesquels les prélèvements dans les cours d'eau à destination des canaux seraient suspendus (il n'y aurait donc plus d'eau dans les canaux).

Cette situation entrainerait nécessairement une baisse du niveau des nappes, Quaternaire et Pliocène. Les gestionnaires d'eau potable auraient donc à faire face à la réduction de la disponibilité des ressources. Dans un premier temps, ils subiraient des surcoûts de pompage, liés à l'abaissement piézométrique, puis, à moyen ou long terme, rencontreraient des problèmes d'approvisionnement avec la nécessité de trouver des solutions de substitution (création de forages plus profonds dans le Pliocène ou captages en rivière).

Pour évaluer les bénéfices liés à la recharge de nappe, nous avons comparé ces scénarios avec la situation actuelle. Nous avons retenu la méthode des coûts évités pour estimer les surcoûts de pompage et les surcoûts d'investissement nécessaires pour exploiter une ressource de substitution.

2.1.2 Données utilisées

Les données utilisées sont les suivantes :

- **Base de données du Syndicat Mixte des Nappes du Roussillon (SMNR)** pour les informations sur les forages (marge d'erreur de 30 m sur la profondeur des forages)²,
- **Base de données Agence de l'eau RMC** pour les données prélèvements AEP (collectif et camping).
- **Base de données du BRGM** pour les niveaux piézométriques des nappes (marge d'erreur de 7 m pour le Pliocène et de 3 m pour le Quaternaire).

Nous avons utilisé les données 2013 pour chacune des bases de données, sauf pour certains prélèvements non renseignés pour lesquels nous avons retenu les volumes prélevés en 2015.

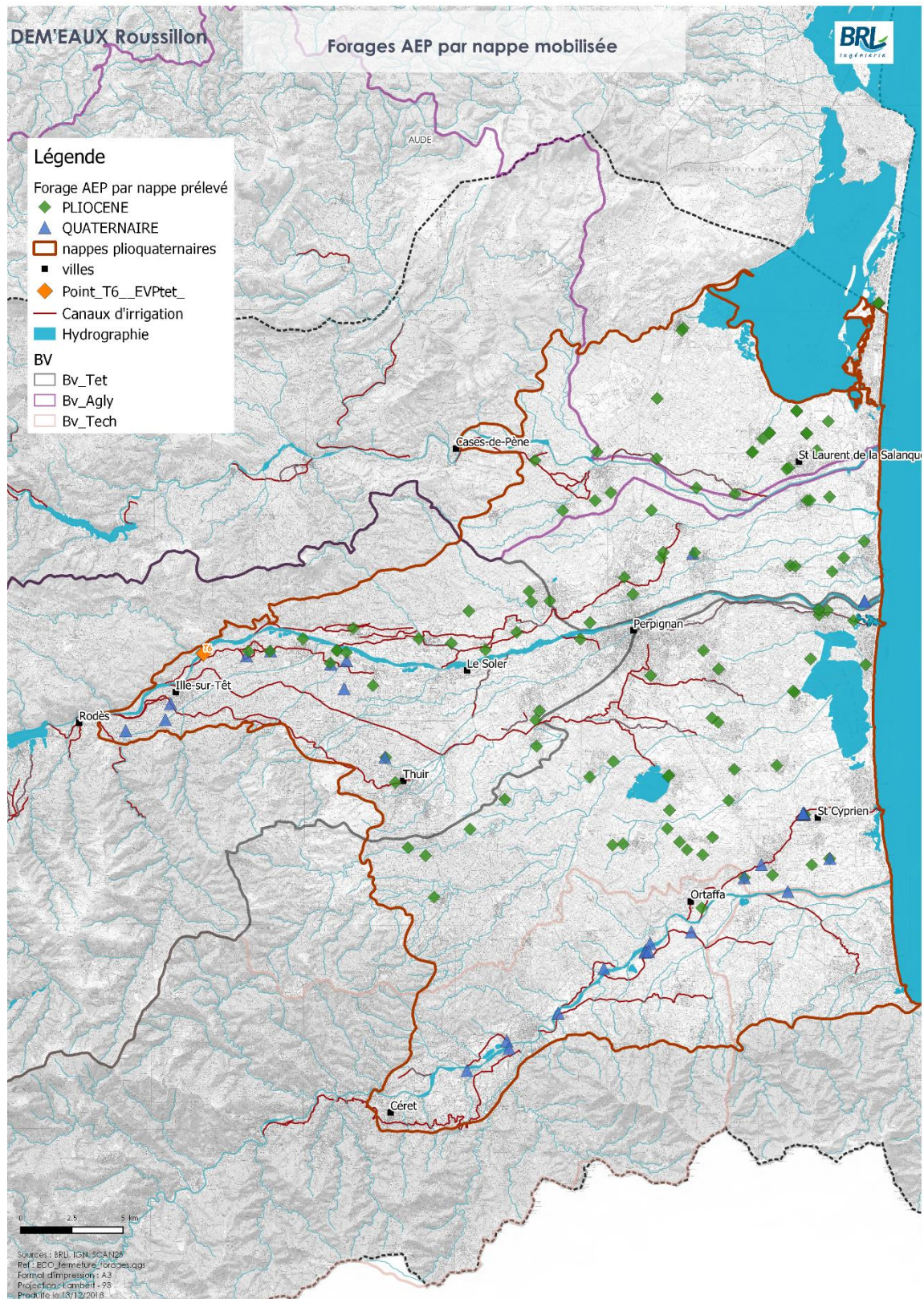
Le tableau suivant présente la situation en 2013 concernant les prélèvements AEP. Environ **44 Mm³** sont prélevés dans les nappes, dont 15 Mm³ (soit 34%) dans le Quaternaire et 29 Mm³ (soit 66%) dans le Pliocène. On dénombre au total **136 forages** pour l'eau potable, dont 31 forages (23%) dans le Quaternaire et 105 (77%) dans le Pliocène.

² Etant donné que les marges d'erreur des données sur la profondeur des forages et du niveau des nappes, certaines valeurs ont été retravaillées. Nous avons ainsi fait en sorte que les forages présents sur la zone d'influence du cours d'eau, puissent être exploitables (c'est-à-dire avec un minima de 3 m entre le niveau piézométrique et la profondeur du forage).

Tableau 1 : Synthèse des principales données à l'année 2013

Données 2013	
Nombre de forages	136
<i>Nombre de forage - Quaternaire</i>	<i>31</i>
<i>Nombre de forage - Pliocène</i>	<i>105</i>
Volumes prélevés (Mm3)	43,9
<i>Volumes prélevés - Quaternaire</i>	<i>14,8</i>
<i>Volumes prélevés - Pliocène</i>	<i>29,1</i>

La carte suivante présente les forages AEP dans le Quaternaire et le Pliocène.



2.1.3 Principales hypothèses

L'analyse est réalisée sur une période d'étude de **40 ans** afin d'avoir une vision de long terme quant à l'évolution du niveau des nappes sans perdre de cohérence au niveau de l'analyse économique.

Les principales hypothèses utilisées dans le modèle sont synthétisées dans le tableau suivant.

Tableau 2 : Principales hypothèses pour l'analyse économique

Variable	Valeur scénario 1	Valeur scénario 2	Unité	Source
Baisse annuelle de la nappe du Quaternaire	1,0	2,0	m/an	BRGM
Baisse annuelle de la nappe du Pliocène	1,0	1,5	m/an	BRGM
Distance d'influence du cours d'eau sur le niveau de la nappe Quaternaire (échanges cours d'eau-nappe)	500	500	m	BRGM
Hauteur limite d'exploitation du forage par rapport à la hauteur de nappe	3	3	m	BRLi et SIAEP ³
Taux d'actualisation	2,5	2,5	%/an	CGDD

L'hypothèse concernant la baisse des nappes dans une situation « sans canaux » a servi à construire deux scénarios :

- Un **premier scénario** dans lequel on envisage une baisse de 1 m/an pour les nappes Quaternaire et Pliocène (scénario 1),
- Un **scénario** dans lequel on envisage une baisse de 2 m/an pour les nappes Quaternaire et Pliocène (scénario 2).

Ces hypothèses sont basées sur le travail de suivi de la nappe effectué par le BRGM. En prenant par exemple les piézomètres de Millas dans le Quaternaire et le Pliocène, on peut observer l'évolution annuelle du niveau des deux nappes. Elle est présentée dans la figure ci-dessous.

Figure 2 : Evolution du niveau des nappes Plio-quaternaires au piézomètre de Millas entre 2002 et 2018 (BRGM)

³ Syndicat intercommunal d'adduction d'eau potable de Bouleternère



Ces courbes montrent que le niveau du Quaternaire augmente de 1,5 m à 2 m et le Pliocène de 1 m à 1,5 m entre la période de forte activité des canaux (avril-août) et la période de faible activité (octobre-février). On peut attribuer cette augmentation des niveaux piézométriques entre avril et août aux canaux puisqu'il s'agit d'une période de faible pluviométrie. Suite aux discussions avec le BRGM, il a été convenu que ces données fournissent un bon ordre de grandeur de l'impact que pourrait avoir l'arrêt de la recharge par les canaux.

Pour chacun des scénarios, nous avons envisagé deux solutions de substitution possibles : la création d'un nouveau forage plus profond (200 m dans le Pliocène) (solution a) ou la mise en place de captage en rivière (solution b). Les coûts de chaque solution sont présentés dans le tableau suivant.

Tableau 3 : Coûts des solutions de substitution

Solution de substitution	Coût d'investissement	Durée d'amortissement	Surcoût de fonctionnement	Source
<u>Solution a :</u> Forages dans le Pliocène (200 m)	500 000 €	20 ans	Surcoût de pompage : 0,00065 €/m ³ /m	BRLi
<u>Solution b :</u> Captage en rivière	1200 €/m ³ /j	20 ans	Surcoût de traitement (produits phytosanitaires): 0,25 €/m ³	BRLi

Les autres hypothèses du modèle sont les suivantes :

- **La distance d'influence du cours d'eau sur le niveau de la nappe Quaternaire :** on considère qu'à moins de 500 m du cours d'eau, le niveau de la nappe est fortement influencé par le cours d'eau et que son niveau ne fluctue pas, même en l'absence de canaux,
- **La hauteur limite d'exploitation du forage :** on considère qu'il faut une distance supérieure à 3 m entre le forage et la hauteur de la nappe pour que le forage puisse fonctionner normalement. En deçà de cette limite, le forage n'est plus utilisé et une solution de substitution doit être trouvée par les gestionnaires AEP.
- **Le taux de croissance des prélèvements :** nous nous sommes basés sur le taux de croissance moyen de la population (2% entre 1968 et 2012, INSEE). On considère donc que les rendements des réseaux et la consommation par habitant sont constants.
- **Le taux d'actualisation :** nous avons retenu un taux de 2,5%, conformément à ce qui est préconisé pour les projets publics.

2.2 PRESENTATION DES DEUX SCENARIOS « CONTREFACTUELS »

2.2.1 Scénario 1 : une baisse du niveau des nappes de 1 m/an

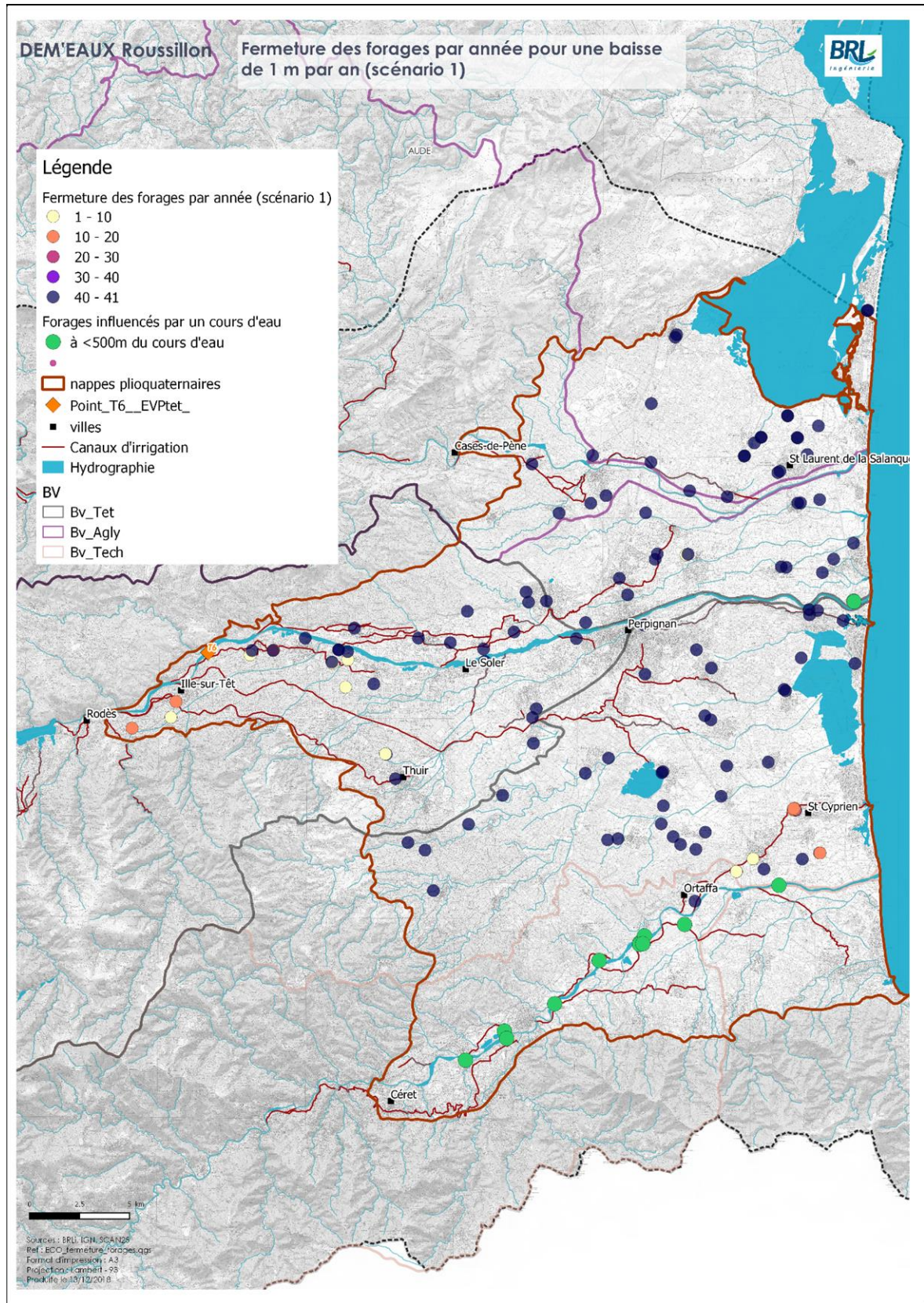
Le scénario 1 considère une baisse du niveau des nappes Quaternaire et Pliocène de 1 m par an. Lorsque le niveau des nappes est à 3 mètres de la profondeur d'un forage, on considère que celui-ci ne peut plus fonctionner. Deux solutions de substitution ont été étudiées :

- **Scénario 1a** : la création de forage dans le Pliocène (à 200 m de profondeur),
- **Scénario 1b** : la création de captages en rivière.

Dans le cadre de ce scénario, le nombre de forage dans le Quaternaire diminue drastiquement puisque 18 forages sur 31 ferment entre l'année 1 et l'année 27. Les 13 forages toujours en activité sont ceux influencés par les cours d'eau (à moins de 500 m d'un cours d'eau).

Dans la carte qui suit sont présentés les forages qui ferment par décade (en jaune, orange, rouge), les forages qui sont toujours en activité à horizon 40 ans (en bleu) et les forages qui sont influencés par les cours d'eau (en vert).

Figure 3: Estimation de l'année de fermeture des forages dans le cadre du scénario de baisse des nappes sur la Plaine du Roussillon (carte BRLi)



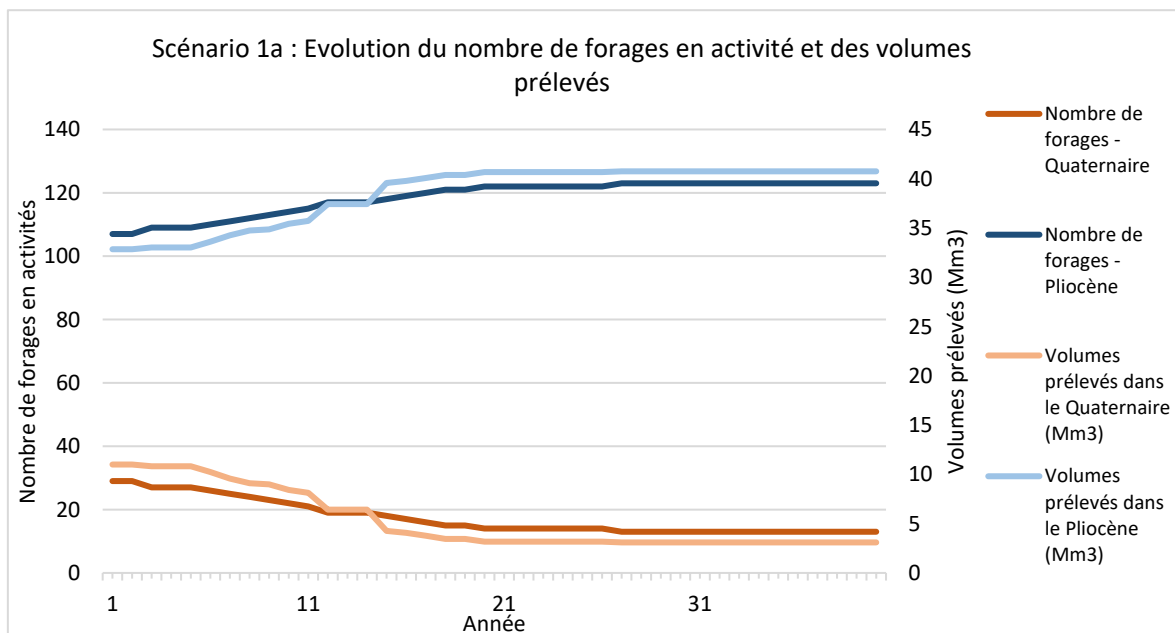
Les volumes à substituer sont de 26 Mm³ (soit 27% des volumes prélevés) à horizon 40 ans. Le cumul de ces volumes sur la période d'étude est de 620 Mm³ sur 2 700 Mm³ (soit 23%). L'ensemble de ces volumes sont prélevés dans le Pliocène pour le scénario 1a et dans les cours d'eau pour le scénario 1b.

Les graphiques suivants présentent pour ces deux situations, l'évolution sur 40 ans des volumes prélevés dans le Quaternaire, le Pliocène et les cours d'eau (volumes substitués) ainsi que l'évolution du nombre de forages.

A noter que les volumes prélevés évoluent selon deux paramètres : (i) en fonction du nombre de forages/captages en activité (ii) en fonction de l'augmentation tendancielle des prélèvements liée à la croissance démographique (2%/an).

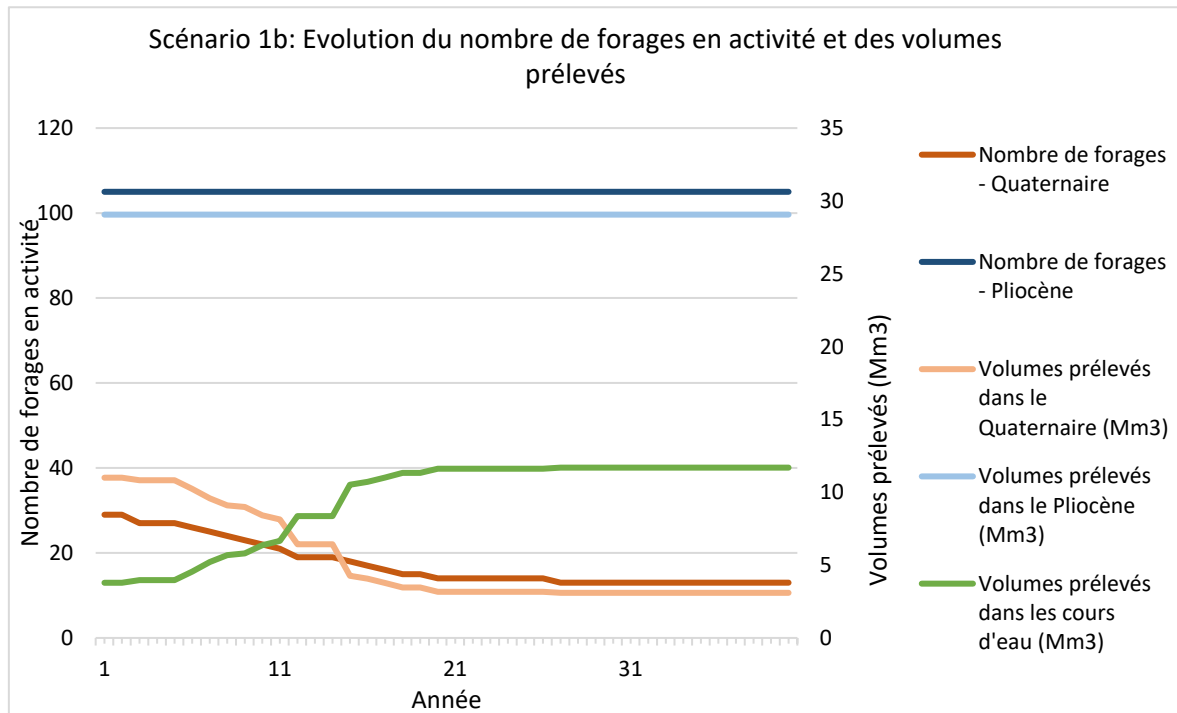
Pour la solution de substitution **a** présentée dans le graphique ci-dessous, les forages du Quaternaire qui ferment sont remplacés au fur et à mesure par des nouveaux forages à 200 m de profondeur dans le Pliocène.

Figure 4 : Estimation de l'évolution du nombre de forage et des volumes d'eau prélevés par nappe pour le scénario 1a



Pour la solution de substitution **b** présentée dans le graphique ci-dessous, les volumes prélevés par les forages qui ferment sont substitués par des prélèvements en rivière. Etant donnée l'hypothèse relativement faible de baisse des nappes (1 m/an), seuls les forages prélevant dans le Quaternaire sont concernés.

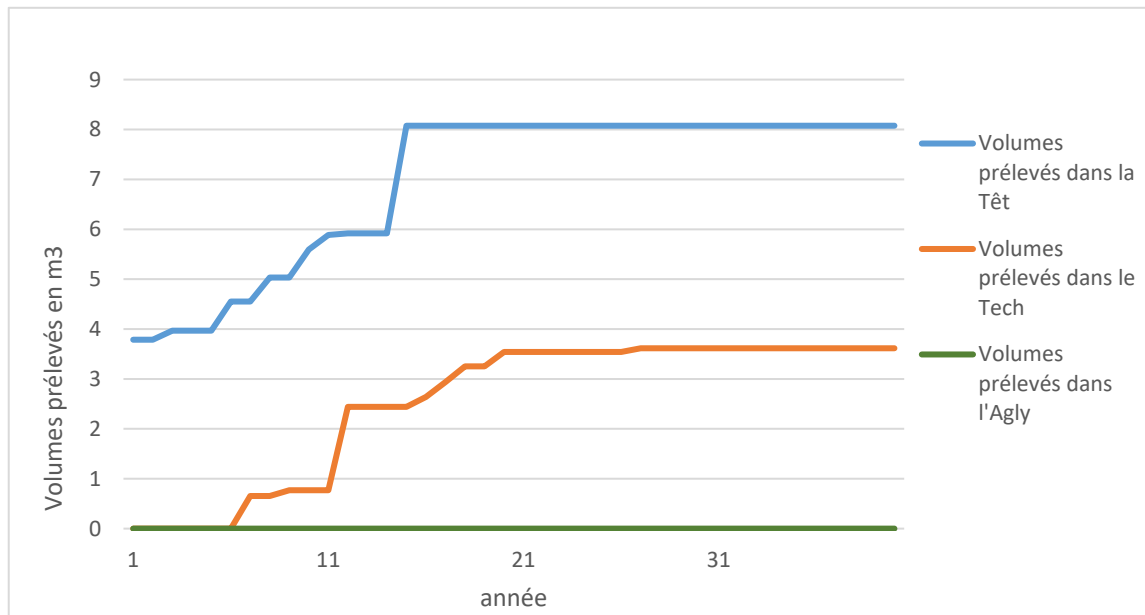
Figure 5: Estimation de l'évolution du nombre de forage et des volumes d'eau prélevés dans les nappes ou le cours d'eau pour le scénario 1b



La répartition des volumes prélevés par cours d'eau est détaillée dans le graphique suivant. A l'année 40 ans les volumes annuels prélevés par cours d'eau sont :

- Têt : 8 Mm³
- Tech : 3,6 Mm³
- Aucun prélèvement n'est réalisé dans l'Agly. En effet, en observant la carte (cf. Figure 3) on peut voir qu'aucun forage ne ferme à proximité de ce cours d'eau.

Figure 6: Estimations des volumes prélevés par cours d'eau dans le scénario 1b (en Mm3)



L'évolution des surcoûts (totaux et unitaire) pour les deux scénarios sont présentés dans les graphiques suivants.

Pour le scénario 1a, les surcoûts évoluent de façon quasi-linéaire. En effet, les surcoûts de pompage représentent la plus grande part des surcoûts, or ceux-ci augmentent proportionnellement à la baisse des nappes et à l'augmentation des volumes prélevés. Les surcoûts d'investissement pour la création de nouveaux forages sont relativement faibles. (Voir Figure 8)

Pour le scénario 1b, l'évolution des surcoûts est croissante et irrégulière. Cette irrégularité est due aux importants investissements nécessaires pour mettre en œuvre la solution de substitution (captage en rivière). Par ailleurs, un traitement plus poussé est nécessaire, ce qui induit un surcoût de fonctionnement de 0.25 €/m³ (cf. Figure 9).

Le surcoût est lissé par les forages qui ne ferment pas puisqu'ils représentent 87% des forages, 73% des volumes prélevés à l'horizon 40 ans et 77% des volumes en cumul sur les 40 ans.

Figure 7: Estimation de l'évolution des surcoûts (toraux et unitaires) engendrés par le scénario 1 pour les deux solutions de substitution (en €)

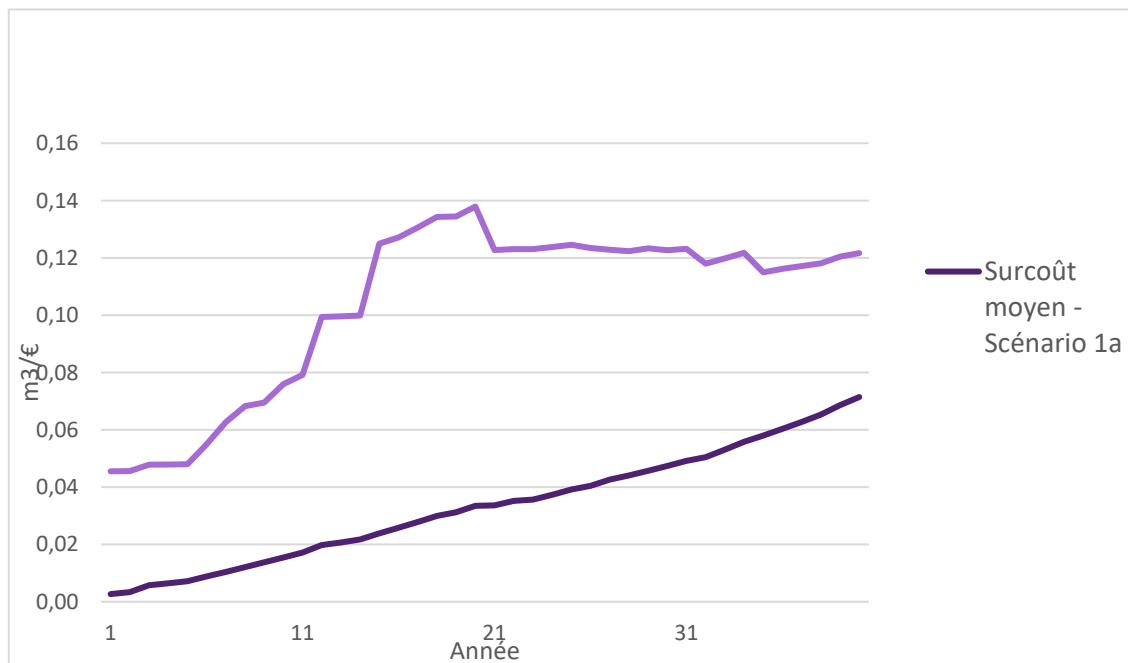
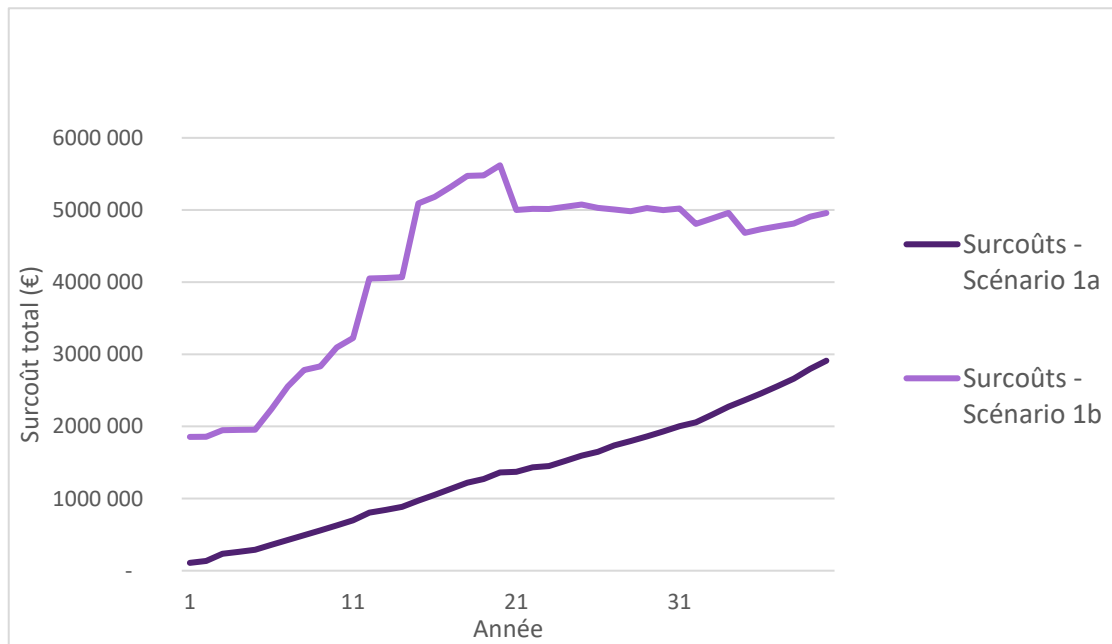


Figure 8 : Détail des différents surcoûts du scénario 1a (en €)

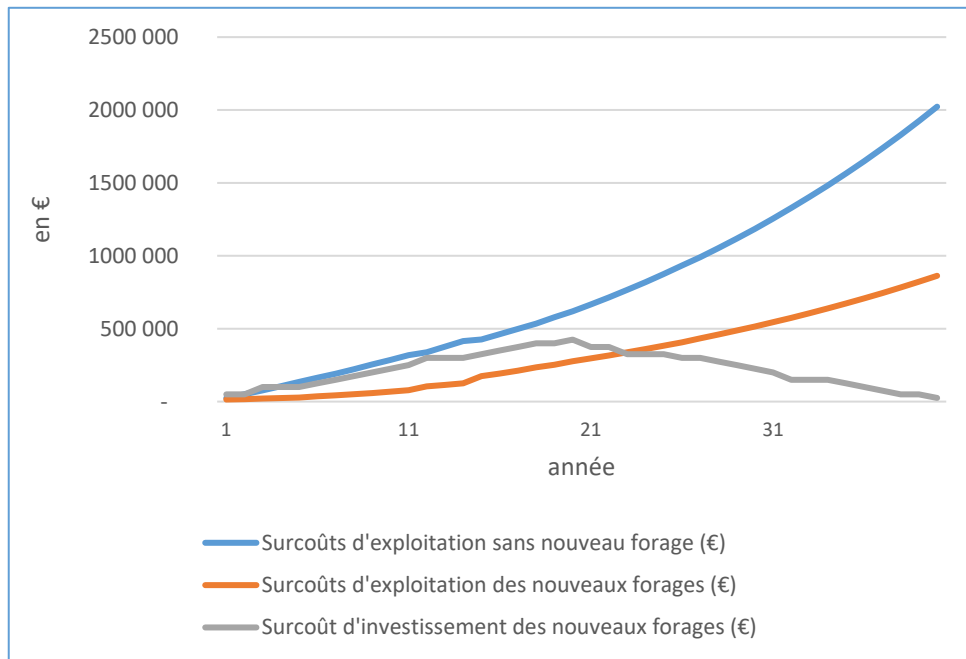
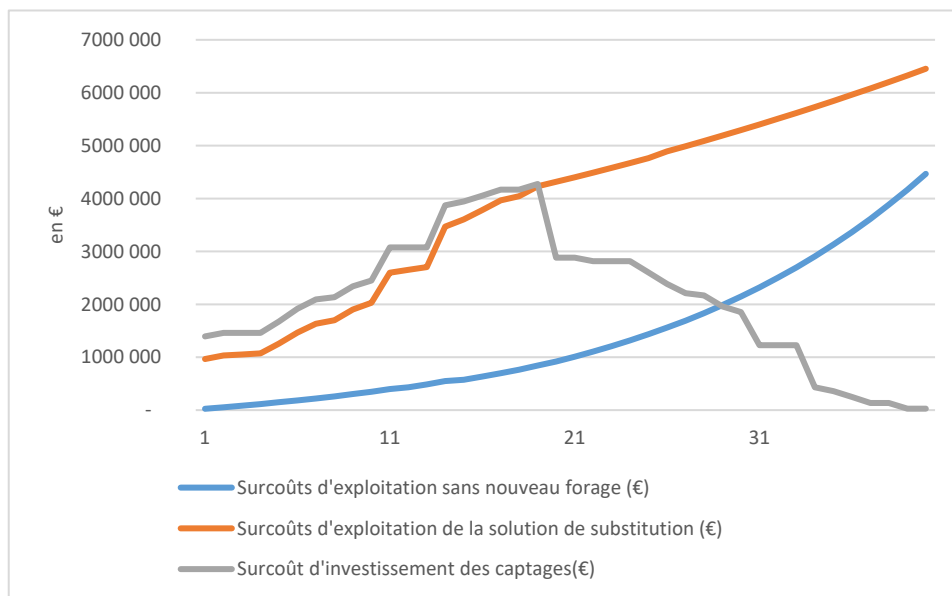


Figure 9 : Détail des différents surcoûts du scénario 1b



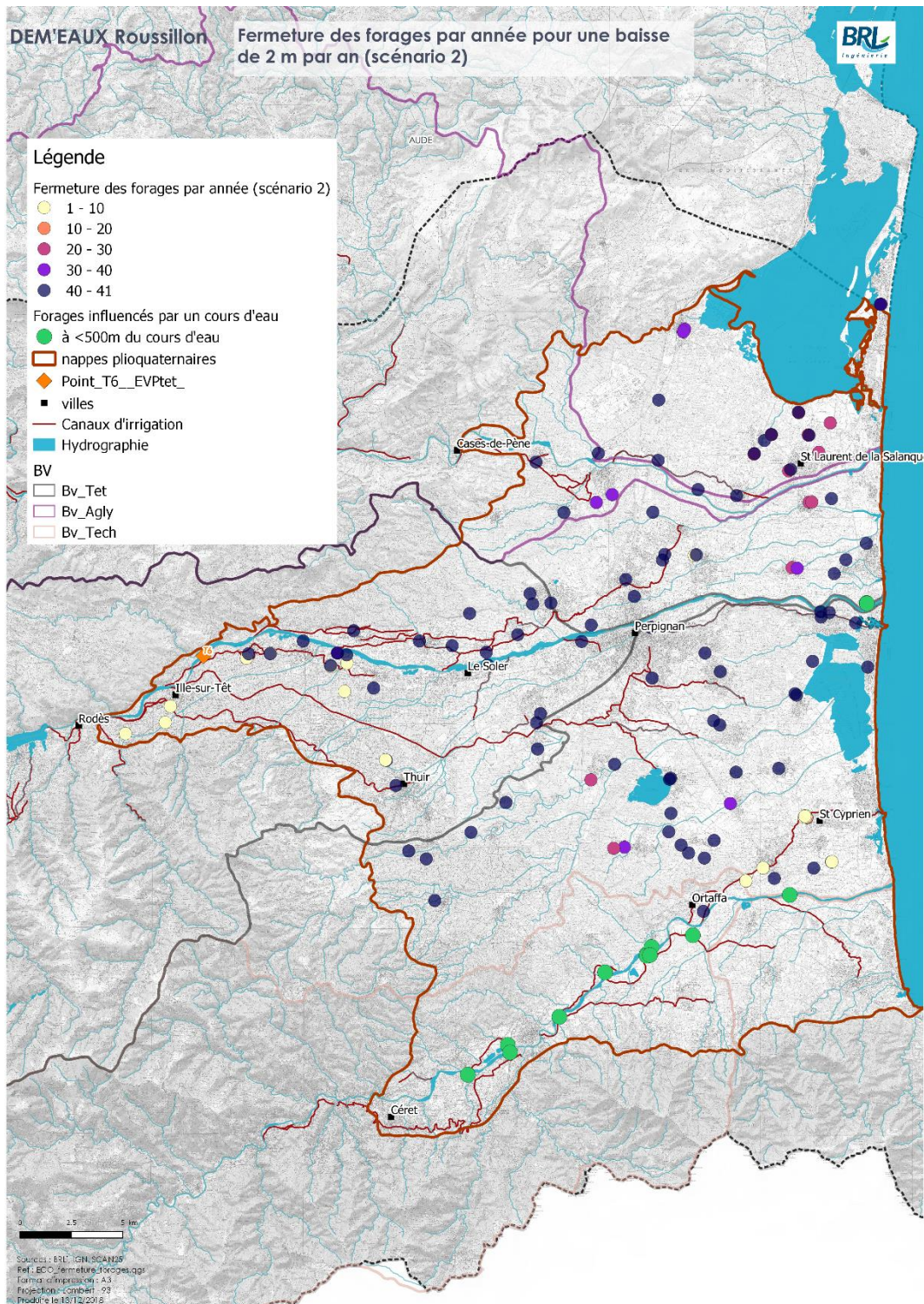
2.2.2 Scénario 2 : une baisse du niveau des nappes de 2 m/an

Le scénario 2 considère une plus forte baisse du niveau des nappes Quaternaire et Pliocène (2 m par an). Lorsque le niveau des nappes est à 3 mètres de la profondeur d'un forage, on considère que celui-ci ne peut plus fonctionner. Deux solutions de substitution ont été étudiées :

- **Solution a** : la création de forage dans le Pliocène (à 200 m de profondeur),
- **Solution b** : la création de captages en rivière.

Dans le cadre de ce scénario, le nombre de forage diminue de manière encore plus importante que pour le scénario 1 puisque 39 forages sur 136 ferment (dont 18 dans le Quaternaire et 21 dans le Pliocène). Les 13 forages dans le Quaternaire toujours en activité sont ceux influencés par les cours d'eau, c'est-à-dire situés à moins de 500 m d'un cours d'eau.

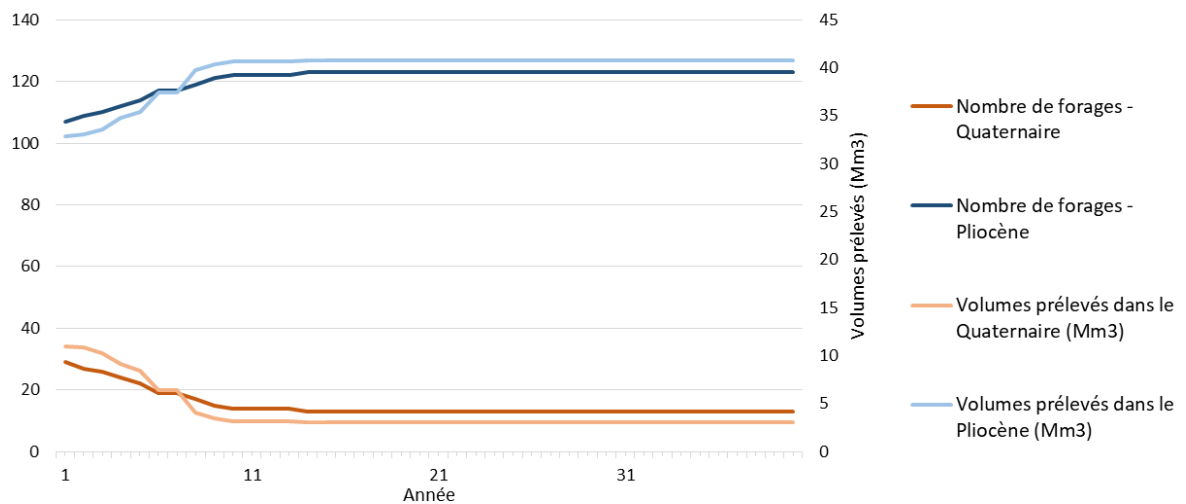
Figure 10 : Estimation de l'année de fermeture des forages dans le cadre du scénario de baisse des nappes sur la Plaine du Roussillon (carte BRLi)



Les volumes à substituer à horizon 40 ans sont de 36 Mm³ (soit 37% des volumes prélevés et 10 Mm³ de plus que le scénario 1). Le cumul sur la période d'étude est de 800 Mm³ sur 2 700 Mm³. L'ensemble de ces volumes sont prélevés dans le Pliocène pour le scénario 2a et dans les cours d'eau pour le scénario 2b.

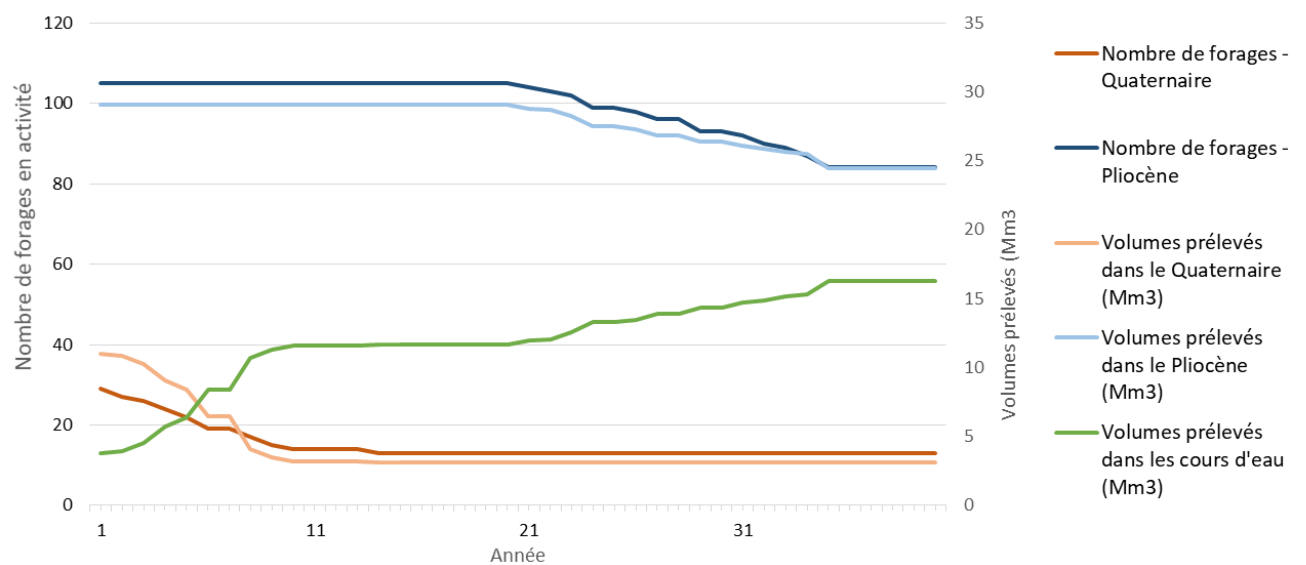
Les graphiques suivants présentent pour les scénarios 2a et 2b, l'évolution sur 40 ans des volumes prélevés dans le Quaternaire, le Pliocène et les cours d'eau (volumes substitués) ainsi que l'évolution du nombre de forages. Notons que dans ces deux graphiques les volumes prélevés évoluent en fonction des forages en activités mais aussi en fonction de l'augmentation estimée de la population en 40 ans.

Figure 11: : Estimation de l'évolution du nombre de forage et des volumes d'eau prélevés par nappe pour le scénario 2a



La différence par rapport au scénario 1 est la vitesse d'arrêt des forages : la plupart des forages ferment au cours des dix premières années dans le scénario 2 contre un étalement sur 20 ans dans le scénario 1.

Figure 12: Estimation de l'évolution du nombre de forage et des volumes d'eau prélevés dans les nappes ou le cours d'eau pour le scénario 2b

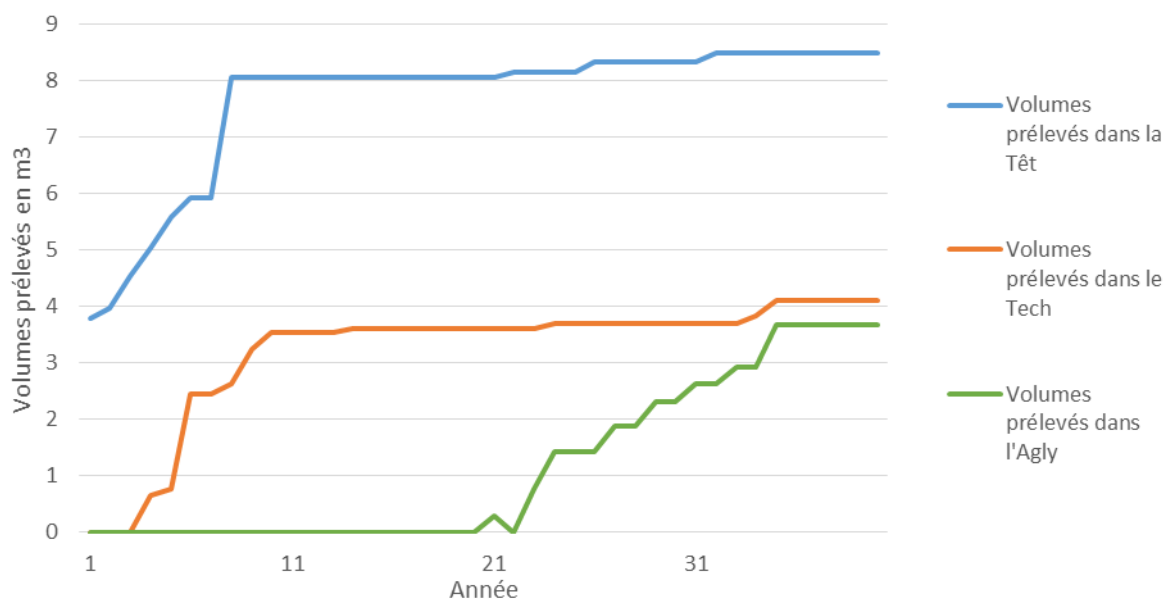


La répartition des volumes prélevés par cours d'eau est détaillée dans le graphique suivant. La Têt est le premier cours d'eau à être mobilisé et celui dont les volumes prélevés augmentent le plus au cours de la période de 40 ans. Vient ensuite le Tech dont les prélèvements débutent en quatrième année. Et enfin les prélèvements sur l'Agly débutent l'année 21, les volumes augmentent rapidement pour atteindre des volumes proches de ceux pris sur le Tech.

A l'année 40 ans les volumes annuels prélevés par les cours d'eau sont :

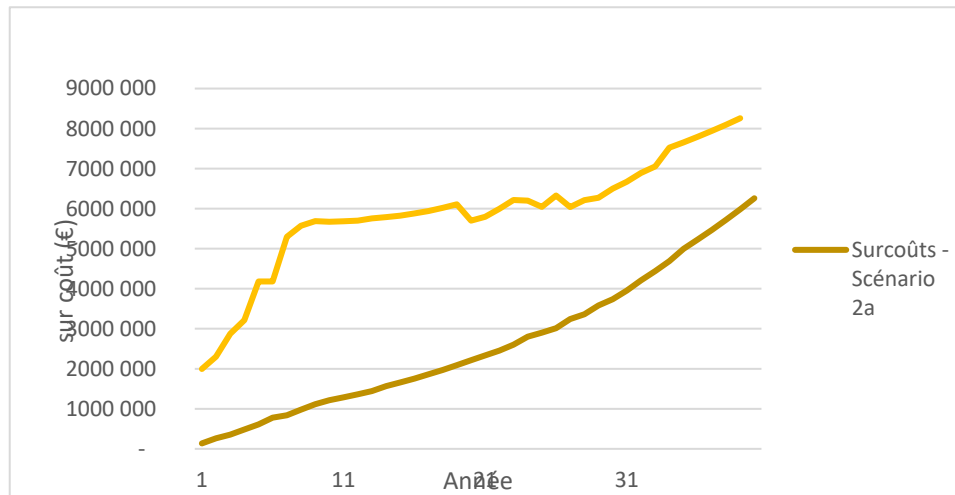
- Pour la Têt : 19 Mm³
- Pour le Tech : 9 Mm³
- Pour l'Agly : 8 Mm³

Figure 13: Estimations des volumes prélevés par cours d'eau dans le scénario 2b (en Mm³)



L'évolution des surcoûts (totaux et unitaire) pour les deux scénarios sont présentés dans les graphiques suivants.

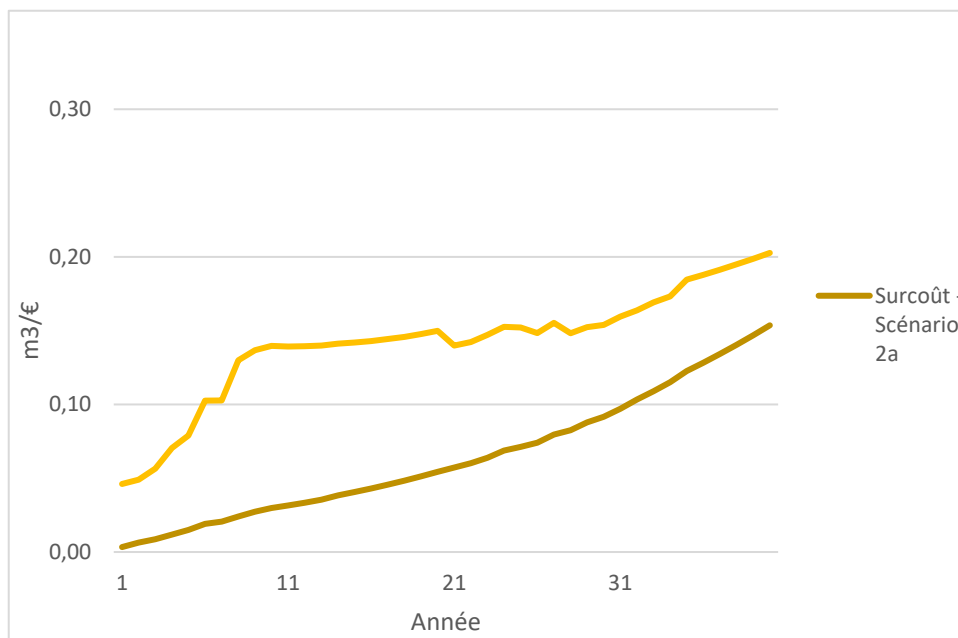
Figure 14: Estimation de l'évolution des surcoûts engendrés par le scénario 2 selon la solution de substitution (en €)



Pour le **scénario 2a** les surcoûts évoluent de façon linéaire pour les mêmes raisons que le scénario 1a.

Pour le **scénario 2b** l'évolution des surcoûts est irrégulière avec une tendance à la hausse. Cette courbe est plus étalée que celle du scénario 1b, du fait qu'une plus grande partie des coûts d'investissement ont pu être amortis sur 40 ans.

Figure 15: Estimation de l'évolution des surcoûts engendrés par le scénario 2 selon la solution de substitution en fonction des volumes concernés (en €/m³)



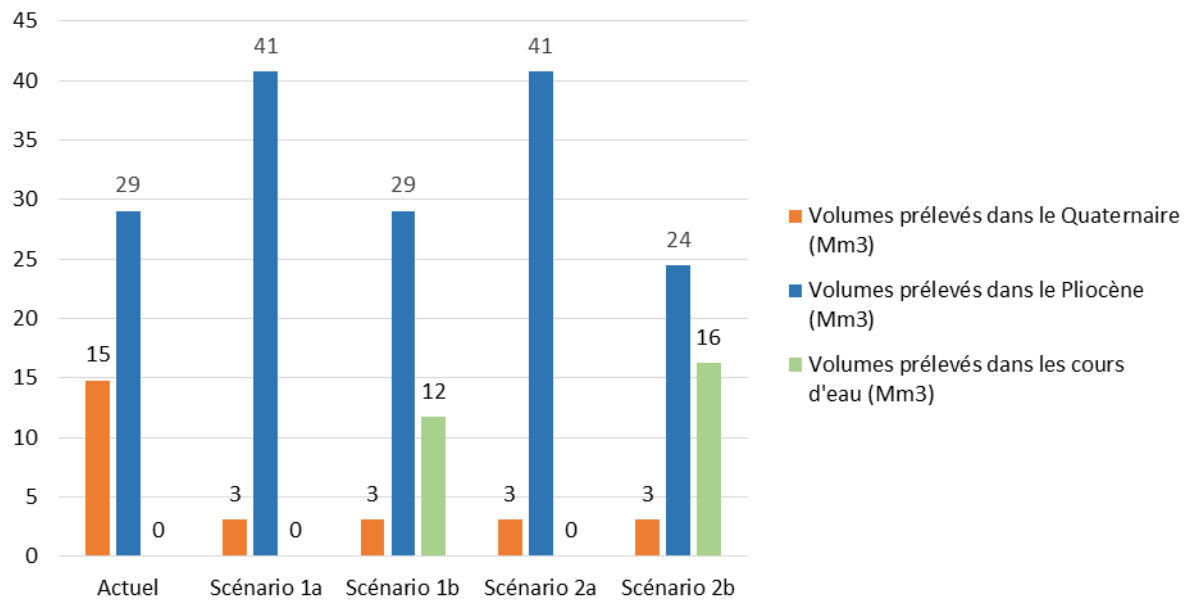
2.3 ANALYSE COMPARATIVE DES SCENARIOS

Le tableau suivant présente les données à l'année 40 (horizon d'étude) et en cumulé sur 40 ans pour les quatre scénarios.

	Scénario 1a	Scénario 1b	Scénario 2a	Scénario 2b
<i>Hypothèse de baisse des nappes (m/an)</i>	1	1	2	2
<i>Solution de substitution</i>	<i>Pliocène</i>	<i>Cours d'eau</i>	<i>Pliocène</i>	<i>Cours d'eau</i>
Valeur des données à l'année 40				
Surcoûts de pompage (K€)	2 020	2 020	3 410	3 410
Surcoûts d'exploitation des solutions de substitution (K€)	860	2 920	2 320	4 070
TOTAL des surcoûts d'exploitation (K€)	2 910	4 950	6 270	8 260
Surcoût moyen (€/m3)	0,07	0,12	0,15	0,20
TOTAL des surcoûts actualisés (€)	1 084	1 847	2 331	3 076
Surcoût moyen actualisé (€/m3)	0,03	0,05	0,06	0,08
Nombre de forages ne subissant pas de surcoûts	13	13	13	13
Nombre de fermeture de forages - Pliocène	0	0	21	21
Nombre de forages - Pliocène	123	105	123	84
Nombre de fermeture de forages - Quaternaire	18	18	18	18
Nombre de forages - Quaternaire	13	13	13	13
Nombre de forage total	136	118	136	97
Volumes prélevés dans le Quaternaire (Mm3)	3	3	3	3
Volumes prélevés dans le Pliocène (Mm3)	41	29	41	24
Volumes prélevés dans la Têt (Mm3)	0	8	0	9
Volumes prélevés dans le Tech (Mm3)	0	4	0	4
Volumes prélevés dans l'Agly (Mm3)	0	0	0	4
Volumes prélevés totaux (Mm3)	44	44	44	44
Volumes substitués (Mm3)	12	12	16	16
Cumul sur 40 ans				
Surcoût de pompage (M€)	31	31	56	56
Surcoût d'investissement solution de substitution (M€)	9	39	15	48
Coût des emprunts (intérêts) (M€)	1	4	2	5
Surcoût d'exploitation des solutions de substitution (M€)	13	95	32	121
Total des surcoûts (M€)	54	169	105	231
Surcoût moyen (€/m3)	0,03	0,10	0,06	0,14
Surcoût totaux des solutions de substitutions (M€)	23	138	49	174
Volumes prélevés dans la Têt (Mm3)	0	278	0	307
Volumes prélevés dans le Tech (Mm3)	0	101	0	128
Volumes prélevés dans l'Agly (Mm3)	0	0	0	47
Volumes substitués (en Mm3)	379	379	482	482
Volumes totaux (en Mm3)	1754	1754	1754	1754
22%				
Cumul actualisé sur 40 ans				
Surcoût de pompage actualisé(M€)	16	16	29	29
Surcoût d'investissement solution de substitution actualisé(M€)	6	25	9	32
Coût des emprunts actualisé (intérêts) (M€)	1	3	1	4
Surcoût d'exploitation des solutions de substitution actualisé(M€)	6	55	15	70
Total des surcoûts actualisé(M€)	29	99	54	135
Surcoût moyen actualisé(€/m3)	0,02	0,06	0,03	0,08
Surcoût totaux des solutions de substitutions actualisé(M€)	13	83	26	106

Les graphiques qui suivent présentent les résultats obtenus dans ce tableau :

Figure 16: Volumes prélevés dans les différentes ressources par scénarios l'année 40.



A horizon 40 ans, les volumes prélevés dans le Quaternaire sont les mêmes pour les quatre scénarios car dans quel que soit l'hypothèse de baisse de nappe (1 ou 2 m/an), l'ensemble des forages dans le Quaternaire ferment exceptés ceux qui sont influencés par les cours d'eau (se situant à moins de 500 m d'un cours d'eau). Comme indiqué précédemment, ces forages ne subissent pas la baisse des nappes comme le reste des forages.

Pour la solution de substitution « forages dans le Pliocène » les volumes prélevés dans le Pliocène et dans le Quaternaire sont les mêmes pour les scénarios 1a et 2a.

Pour la solution « captages en rivière », les volumes prélevés sont différents puisque les volumes substitués se font dans les cours d'eau. Ainsi pour le scénario 1b, les 26 Mm³ venant des forages du Quaternaire ayant fermé sont prélevés dans les cours d'eau. Pour le scénario 2b, 10 Mm³ (issus des 21 forages fermés dans le Pliocène) s'ajoutent à ces 26 Mm³. Les volumes prélevés dans le Pliocène baissent de 10 Mm³ pour atteindre 54 Mm³ tandis que les volumes prélevés dans le cours d'eau sont de 36 Mm³.

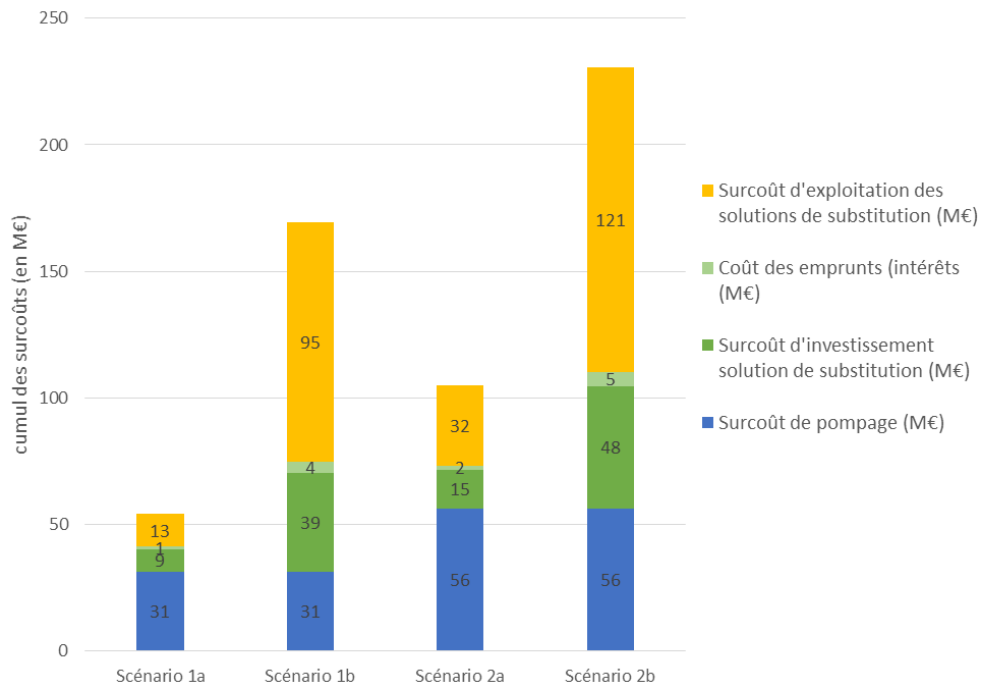
Les surcoûts des quatre scénarios sont synthétisés dans le graphique suivant (cumul sur 40 ans).

De manière synthétique, les surcoûts totaux (sur 40 ans) sont les suivants :

- **Scénario 1a** : 54 M€ - 29 M€ actualisés
- **Scénario 1b** : 169 M€ - 99 M€ actualisés
- **Scénario 2a** : 105 M€ - 54 M€ actualisés
- **Scénario 1b** : 231 M€ - 135 M€ actualisés

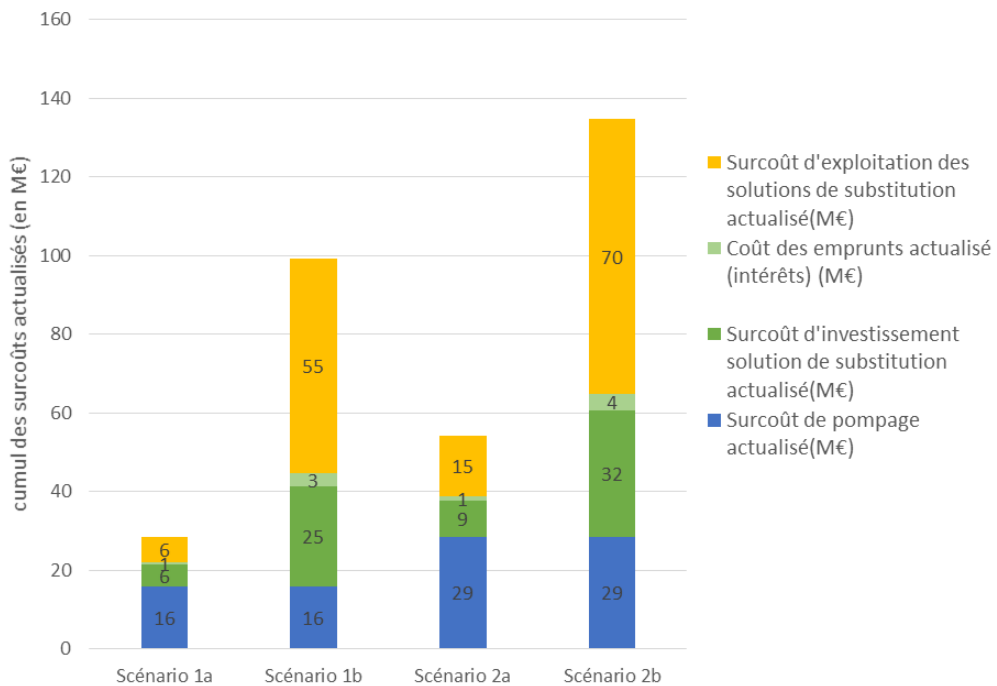
La solution de substitution « forages dans le Pliocène » apparaît comme la moins coûteuse mais il est possible que les gestionnaires AEP rencontrent un problème d'approvisionnement à plus long terme. Elle n'est donc pas à considérer comme une solution soutenable. Par ailleurs, le modèle n'intègre pas le risque d'accélération de baisse du niveau des nappes du fait de l'accroissement des prélèvements dans le Pliocène. Si ce risque était considéré, les surcoûts des scénarios 1a et 2a seraient plus élevés.

Figure 17: Cumul sur 40 ans des surcoûts non actualisés pour les 4 scénarios (en M€).



Les surcoûts actualisés sont présentés dans le graphique suivant.

Figure 18: Cumul sur 40 ans des différents surcoûts actualisés pour les 4 scénarios (en M€).



Le tableau suivant présente les surcoûts moyens selon si une solution de substitution doit être trouvée ou non :

- **Les forages toujours en activité en fin de période** : dans ce cas, les gestionnaires AEP subissent uniquement des surcoûts de pompage liés à la baisse de la nappe.
- **Les forages pour lesquels une solution de substitution doit être mise en œuvre** : dans un premiers temps, les gestionnaires AEP subissent uniquement des surcoûts de pompage, jusqu'à ce que le niveau de la nappe soit trop bas pour continuer à utiliser le forage. La mise en place d'une solution de substitution engendre des surcoûts d'investissement (création du nouveau forage/captage) et de fonctionnement (surcoût de pompage ou de traitement).

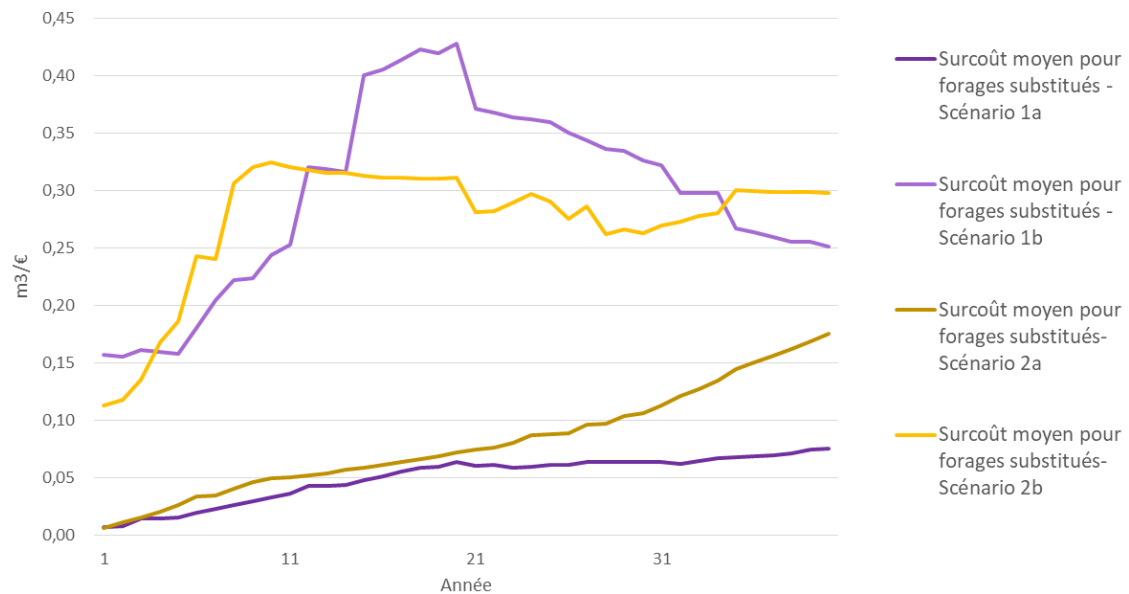
Figure 19: Tableau des surcoûts moyens par décade en fonction du type de forages (€/m³)

Moyennes décennales et valeurs extrêmes du surcoût au m3 (€ /m3)				
Pour un forage non-substitué (exploitation)	Scénario 1a	Scénario 1b	Scénario 2a	Scénario 2b
Moyenne surcoût pompage_0_10 ans	0,004	0,004	0,008	0,008
Moyenne surcoût pompage_10_20 ans	0,01	0,01	0,03	0,03
Moyenne surcoût pompage_20_30 ans	0,03	0,03	0,06	0,06
Moyenne surcoût pompage_30_40 ans	0,06	0,06	0,11	0,11
Maximum du surcoût annuel de pompage	0,07	0,07	0,14	0,14
Surcoût moyen sur 40 ans (€/m3)	0,03	0,03	0,05	0,05
Pour un forage substitué (investissement + exploitation)	Scénario 1a	Scénario 1b	Scénario 2a	Scénario 2b
Moyenne surcoût substitution_0_10 ans	0,02	0,19	0,03	0,22
Moyenne surcoût substitution_10_20 ans	0,05	0,37	0,06	0,31
Moyenne surcoût substitution_20_30 ans	0,06	0,35	0,09	0,28
Moyenne surcoût substitution_30_40 ans	0,07	0,28	0,15	0,29
Maximum du surcoût annuel de substitution	0,08	0,43	0,18	0,32
Surcoût moyen sur 40 ans (€/m3)	0,05	0,30	0,08	0,27

Les surcoûts sont quasi-identiques pour les forages substitués par des forages dans le Pliocène et les forages non-substitués. Par contre, pour ils sont beaucoup plus élevés (5 à 10 fois supérieurs) lorsqu'ils concernent la solution de substitution de captage en rivière.

Le graphique suivant compare pour chaque scénario, l'évolution des surcoûts moyens pour les forages substitués.

Figure 20: Evolution des surcoûts moyens des forages substitués en fonction des volumes prélevés (en €/m³)



2.4 ANALYSE DE SENSIBILITE

PARAMETRES HYDROGEOLOGIQUES

HAUTEUR DE BAISSÉ DES NAPPES

L'analyse de sensibilité en fonction de la baisse des nappes montre une hausse linéaire des surcoûts sur 40 ans pour les deux modes de substitution. Les surcoûts pour la solution « captage en rivière » augmentent légèrement plus rapidement.

Hauteur de baisse des nappes (m/an)					
Surcoût totaux (M€) cumul	0	1	2	3	4
Pliocène	0,00	54	105	156	211
Captages en cours d'eau	0,00	169	231	286	341

INFLUENCE DU COURS D'EAU

La distance d'influence du cours d'eau fait varier les surcoûts (cumul sur 40 ans) de -1% (700 m) à 23% (0 m ; S1b). La sensibilité des résultats économiques à ce paramètre dépend de la répartition des forages sur le territoire. Notons que cette influence ne concerne que les forages dans le Quaternaire qui sont minoritaires. En effet, ils représentent 23% des forages AEP et 33% des volumes prélevés.

On peut retenir que la distance d'influence des cours d'eau a une influence assez faible sur les surcoûts.

Distance d'influence des cours d'eau (m)				
Surcoût (M€) sur 40 ans pour tous les forages	0m	200 m	500 m	700 m
S1a - Baisse de 1 m - Pliocène	65	58	54	54
S1b - Baisse de 1 m - Captage	208	184	169	168
S2a - Baisse de 2 m - Pliocène	119	110	105	104
S2b - Baisse de 2 m - Captage	272	246	231	229

PARAMETRES ECONOMIQUES

Taux de Croissance des Prélèvements

La graphique suivant présente le surcoût en fonction du taux de croissance des prélèvements.

Taux de croissance des prélèvements (%/an)			
Surcoût (M€) sur 40 ans	0%	1%	2%
S1a - Baisse de 1 m - Pliocène	54	69	90
S1b - Baisse de 1 m - Captage	169	227	306
S2a - Baisse de 2 m - Pliocène	105	135	175
S2b - Baisse de 2 m - Captage	231	308	416

Avec un taux de croissance des prélèvements de 1%, il y a une augmentation du surcoût de l'ordre de 25%. Pour une augmentation des prélèvements de 2%, l'augmentation des surcoûts est 40 à 45%.

C'est un paramètre auquel il faudra faire attention dans la suite du projet du fait cette forte sensibilité. Les estimations prises pour ce paramètre auront un impact significatif sur les résultats du modèle. Le cumul des surcoûts varie en effet du simple au double. Toutefois les surcoûts au m³ sont quasiment identiques.

Coût de Traitement de l'Eau

Le tableau suivant présente les résultats du test de sensibilité en fonction du coût de traitement des captages en rivière (0,10, 0,25 ou 0,50 /m³). Le surcoût sur 40 ans varie environ de -30% à +50%.

Coût de traitement			
Surcoût (M€) sur 40 ans pour tous les forages	0,10	0,25	0,50
S1b - Baisse de 1 m - Captage	113	169	264
S2b - Baisse de 2 m - Captage	158	231	351

Période d'Amortissement

Le tableau suivant présente les surcoûts par scénario en fonction de la période d'amortissement des investissements des solutions de substitution (20, 30 ou 40 ans).

Période d'amortissement (année)			
Surcoût (M€) sur 40 ans	20	30	50
S1a - Baisse de 1 m - Pliocène	54	54	51
S1b - Baisse de 1 m - Captage	169	167	154
S2a - Baisse de 2 m - Pliocène	105	103	98
S2b - Baisse de 2 m - Captage	231	227	213

En considérant une période d'amortissement plus longue, les surcoûts diminuent légèrement.

A noter que l'augmentation de la période d'amortissement a un effet plus significatif pour les scénarios 1b et 2b car l'investissement pour la création de captages en rivière est plus conséquent que la construction de nouveaux forages.

3. CONCLUSION

Le bénéfice de recharge des nappes lié aux canaux peut être estimé entre 54 et 231 M€ sur 40 ans (entre 29 et 135 M€ en valeur actualisée) selon le scénario considéré. Ainsi, en l'absence de canaux, les surcoûts seraient les suivants :

- Entre 31 et 56 M€ en surcoût de pompage (*valeur actualisée : 16-29 M€*),
- Entre 10 et 53 M€ en surcoût d'investissement (financé sur emprunts et donc avec les intérêts) (*valeur actualisée : 7-36 M€*),
- Entre 13 et 121 M€ en surcoût d'exploitation des solutions de substitution (*valeur actualisée : 6-70 M€*).

Les surcoûts sont très variables selon la solution de substitution retenue : entre 0,05 à 0,08 €/m³ pour les forages dans le Pliocène et entre 0,27 et 0,30 €/m³ pour les captages en rivière.

La solution « Pliocène » apparaît moins coûteuse mais possiblement moins durable. En effet, il existe un risque de surexploitation et d'accélération de baisse de la nappe. L'accélération de la baisse n'a pas été prise en compte dans ce modèle, mais il est probable qu'à long terme cette solution ne soit pas viable.

La solution de substitution « captages en rivière », malgré un surcoût d'exploitation supérieur, pourrait être plus durable. A horizon 40 ans, les prélèvements maximum (scénario 2) représenteraient 0,27 m³/s pour la Têt, 0,13 m³/s pour le Tech et 0,12 m³/s pour l'Agly.

A noter toutefois que la capacité des nappes phréatiques à constituer une réserve devra être remplacée par la création de réservoirs de stockage afin d'assurer un équilibre besoins/ressources tout au long de l'année. Les coûts induits par cette contrainte n'ont pas été pris en compte dans le modèle et il est donc probable que la mise en place de cette solution de substitution soit plus onéreuse que présentée ici.

Annexes

L'INFLUENCE DES COURS D'EAU SUR LES FORAGES

Le cours d'eau fait office de niveau d'équilibre qui maintient le niveau piézométrique sur une certaine distance. Afin d'estimer cette distance nous nous sommes basé sur l'expérimentation de recharge de la nappe du Quaternaire menée par BRGM. (SOURCE !). Lors de ces expérimentations ils ont pu observer qu'au-delà d'un kilomètre la recharge effectuée impacte réellement la nappe. Signifiant qu'avant ce kilomètre les échanges entre le cours d'eau et la nappe temporent les effets des recharges. Ainsi on peut considérer qu'il y a une connexion significative des flux d'eau entre la nappe et le cours d'eau sur 1km.

Dans un premier temps c'est cette hypothèse de zone d'influence d'1 km qui a été utilisée dans le modèle. Ainsi les forages dans la zone d'influence du cours d'eau ne sont pas impactés par la baisse de la nappe envisagée dans le modèle. Or les résultats obtenus avec cette hypothèse incluaient des forages souvent touchés par la baisse de la nappe. Notamment les forages d'Ille-sur-têt ou de Bouleternère qui connaissent des baisses drastiques lors des hivers secs.

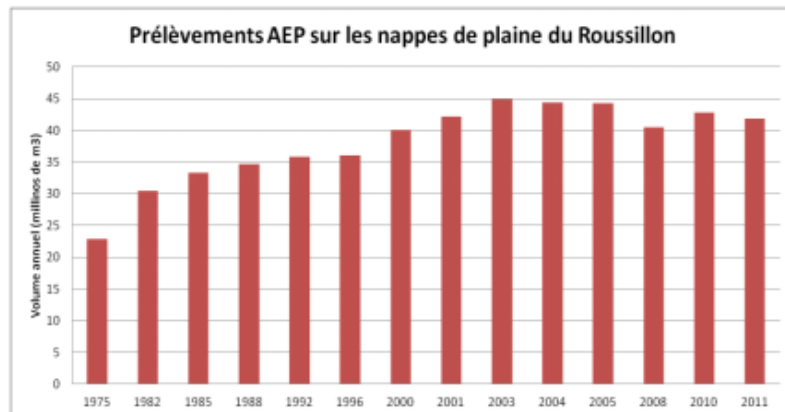
En vue de ces résultats et de l'étude sur la recharge artificielle des nappes Quaternaire portée par le Syndicat Mixte des nappes de la plaine du Roussillon en hiver 2016-2017, cette distance a été revue à la baisse.

En effet l'étude du SMNR sur l'infiltration d'eau dans les alluvions du Quaternaire le long du Boulès ils ont obtenu une infiltration rapide sur 500m.

C'est cette distance qui a finalement été retenue pour le modèle.

SAGE NAPPE DE LA PLAINE DU ROUSSILLON, 2014

La hausse des prélèvements consécutive au développement du territoire a concerné essentiellement le Pliocène : les prélèvements pour l'AEP ont quadruplé entre les années 70 et 2000.



Cette hausse a eu pour effet une **baisse notable des niveaux du Pliocène**, de manière continue et généralisée sur l'ensemble de la plaine du Roussillon. Toutefois, sur les 2 à 3 dernières années, les niveaux semblent amorcer une stabilisation, grâce à une climatologie plus favorable et à un maintien des prélèvements à un niveau constant, notamment pour l'eau potable. Cette tendance reste à confirmer sur la durée.

