



HAL
open science

Guide d'étude de la faisabilité technique et économique d'un projet de Réutilisation des Eaux Usées Traitées (REUT) en irrigation agricole

Malo Huard

► **To cite this version:**

Malo Huard. Guide d'étude de la faisabilité technique et économique d'un projet de Réutilisation des Eaux Usées Traitées (REUT) en irrigation agricole. Sciences de l'environnement. 2010. hal-02594961

HAL Id: hal-02594961

<https://hal.inrae.fr/hal-02594961>

Submitted on 15 May 2020

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.

2010

Guide d'étude de la faisabilité technique et économique d'un projet de Réutilisation des Eaux Usées Traitées (REUT) en irrigation agricole

Diplôme d'Ingénieur Agronome d'AGROSUP DIJON
Spécialisation Sciences et Techniques des Agro-Equipements

Diplôme de l'Institut Supérieur Européen des Agro-Equipements

Manon HUARD

Maître de stage : Bruno MOLLE

Professeur référent : Jean-Pierre

LEMIERE

« C'est quand le puits est à sec que l'eau devient richesse. »

[Proverbe français]

Remerciements

Je remercie l'ensemble du Cemagref, notamment le laboratoire LERMI, de m'avoir permis de réaliser ce stage. Je souhaite adresser également mes remerciements à toutes les personnes qui m'ont aidée, de près ou de loin, dans l'élaboration, le déroulement et l'analyse de ce travail.

Je pense tout particulièrement à :

- ◆ Bruno MOLLE, mon maître de stage, pour son encadrement, sa disponibilité, son écoute et la confiance qu'il a su me témoigner.
- ◆ Jean-Pierre LEMIERE, mon professeur référent, pour les conseils apportés et les discussions qui ont guidé mon travail.
- ◆ Mathieu AUDOUARD, pour sa compagnie tout au long des essais réalisés, pour ses connaissances et sa « ponctualité ».
- ◆ Annie BORDAZ, qui a veillé au bon déroulement logistique de mon stage.
- ◆ Laurent HUET et Salim BOUNOUA, pour leur accueil, leur soutien, leur sympathie et leurs connaissances.
- ◆ Chantale ROSA et Pascal DI MAIOLO, pour le temps précieux qu'ils m'ont accordé et pour l'aide qu'ils m'ont apporté au cours de mon stage.
- ◆ L'ensemble du laboratoire LERMI, dont l'équipe des thésards et des stagiaires, ainsi que Jacques GRANIER, Séverine THOMAS et Carole ISBERI, pour m'avoir accueillie les bras ouverts et pour avoir facilité ma vie au quotidien lors de ce stage.

J'ajoute également à cette liste, toutes les personnes dont les noms suivent, pour leur collaboration et le temps passé à répondre à mes questions :

Céline PAPIN (Canal de Provence), Dominique GÂTEL (Veolia Eau), Giles MALAMAIRE (ARPE), Patricia LENNE (GRCIVAM PACA), Véronique REBHOLTZ (FNCIVAM), Didier JAMMES (Bio de Provence), Philippe COUSINIE (LEGTA), Thomas ALGLAVE (Chambre Régionale d'Agriculture de Picardie), Jean-Philippe BERNARD (Chambre d'Agriculture de Charente-Maritime), Marc HOFMANN et Thomas ROSPARS (Chambre d'Agriculture du Var), Frédéric ZAHM (Cemagref Bordeaux), Philippe DESMAISON (Initiatives Pour une Agriculture Citoyenne & Territoriale), Sylvie MORARDET (Cemagref Montpellier), Muriel VANDERCHMITT et Julie CHAMBOST (Chambre d'Agriculture du Gard), Viviane SIBE (Chambre d'Agriculture du Vaucluse), Cédric JAFFRY (Chambre d'Agriculture de Lot-et-Garonne), Jean-Michel GILLOT (Chambre d'Agriculture de l'Aude), Jacques FERAUD (Chambre d'Agriculture des Pyrénées Orientales), Laurent FOMBEUR (Chambre d'Agriculture de la Vienne), Alfred KLINGHAMMER (Chambre d'Agriculture du Haut-Rhin), Brigitte BOISSELIER (Chambre d'Agriculture du Rhône), Marie CASTAGNET et Christophe LAFON (Chambre d'Agriculture de l'Hérault), Sophie STEVENIN (Chambre d'Agriculture de la Drôme).

Résumé

Recycler les eaux usées et les réutiliser à des fins agricoles est une pratique qui prend de plus en plus d'ampleur de part le monde. La Réutilisation des Eaux Usées Traitées (REUT) en agriculture est en effet pratiquée dans une cinquantaine de pays, sur une superficie correspondant à 10% de l'ensemble des terres irriguées. Elle permet d'atténuer les problèmes de pénuries d'eau, de réduire la pollution des ressources en eau, et de sécuriser les rendements agricoles.

Contrairement à l'Espagne ou au Mexique, où une forte proportion des eaux usées traitées sert à l'irrigation agricole, la France connaît un retard dans le domaine. Un projet de loi pour encadrer cette pratique a été publié en septembre 2010. Cette définition d'un cadre législatif devrait conduire à un développement certain de cette activité dans les années à venir.

La présente étude est le résultat d'un travail effectué au sein du Laboratoire d'Etudes et de Recherche sur le Matériel d'Irrigation (LERMI) du Cemagref d'Aix-en-Provence. L'objectif visé à travers ce travail est de proposer un guide d'étude de la faisabilité technique et économique des projets de REUT en irrigation agricole, et donc de mieux cerner les effets du développement de la REUT, à court, à moyen et à long termes. Cette étude est ainsi fondée sur une identification des coûts et des bénéfices directs et indirects de la REUT, afin d'évaluer la faisabilité et la possible rentabilité des projets. Une synthèse bibliographique, la réalisation d'essais normalisés sur du matériel de micro-irrigation et un travail d'enquêtes ont été réalisés dans ce but.

Des intervalles de prix ont été établis à partir de certains cas existants en France. Ils permettent d'estimer les effets économiques induits par la REUT en irrigation agricole. Certains effets non-économiques, tels que les effets environnementaux, ont pu être traduits en termes financiers, tandis que d'autres, tels que les impacts sociaux, restent difficilement évaluables. Concernant l'évaluation de la durabilité des projets de REUT, une sélection d'indicateurs pertinents est proposée. Les barèmes de notation sont actuellement en étude ; ils vont notamment évoluer selon l'importance des critères considérés dans un projet de REUT.

Mots-clés : durabilité, agriculture, irrigation, réutilisation des eaux usées traitées.

Abstract

Recycling a waste water and reusing it for agriculture purposes is a practice seen more and more often around the world. The re-use of treated waste water in agriculture is in fact practiced in about fifty countries, on a surface corresponding to 10 % of all irrigated lands. It allows us to limit the problems of water shortages, reduce the pollution of water resources, and secure the agricultural outputs.

Contrary to Spain or to Mexico, where a strong proportion of treated waste water is use to agricultural irrigation, a certain delay in this domain exists in France. A bill to enforce this practice was published in September 2010, resulting in a legal framework that should lead to significant development of this activity in years to come.

The present study is the result of research undertaken within the laboratory of studies and research on the irrigation equipment (called LERMI) of Cemagref in Aix-en-Provence. The objective of this project is to propose a guide the technical and economic feasibility of the projects of treated wastewater re-use in agricultural irrigation, and thus to encircle better the effects of the development of this activity, in short, medium and long-term. This study bases itself on an identification of the direct and indirect costs and benefits of the treated wastewater re-use, thereby estimating the feasibility and the possible profitability of the projects. A bibliographical summary, the realization of experiments on micro-irrigation equipment and a study of inquiries were realized in this project.

Valuable intervals were established from certain existing cases in France. This allows approaching the economic effects inferred by the treated wastewater re-use in agricultural irrigation. Certain non-economic effects, such as environmental effects, were allowed to be translated into financial terms, whereas others, such as social impacts, remain assessable, albeit with some difficulties. Concerning the evaluation of the durability of these projects, a selection of relevant indicators are proposed. The tables of notation are at present in study; they are going to change, particularly according to the importance of the criteria evaluated considered in a project of waste water re-use.

Key-words: sustainability, agriculture, irrigation, treated waste water reuse.

Liste des sigles et acronymes

A : Annuité	IDEA : Indicateurs de Durabilité des Exploitations Agricoles
ACB : Analyse Coûts/Bénéfices	JA : Jeunes Agriculteurs
AEP : Adduction d'Eau Potable	JDW : John Deere Water
AFSSA : Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments	Mha : Milliards d'hectares
AFSSET : Agence Française de Sécurité Sanitaire, de l'Environnement et du Travail	MES : Matières En Suspension
AMAP : Association pour le Maintien d'une Agriculture Paysanne	MF : Membrane Filtration
ANSES : Agence Nationale de Sécurité Sanitaire (résultat de la fusion entre l'AFSSA et l'AFSSET)	NDJ : Naan Dan Jain
BBA : Bouc-Bel-Air	NF : NanoFiltration
CEMAGREF : CEntre national du Machinisme Agricole, du Génie Rural, des Eaux et Forêts	NPK : Azote-Phosphore-Potassium
CA : Chiffre d'Affaire	NTF : NeTaFim
CF : Coliformes Fécaux	NTU : Nephelometric Turbidity Unit
CIID : Commission Internationale des Irrigations et du Drainage	OCDE : Organisation de Coopération et de Développement Economiques
CIVAM : Centres d'Initiatives pour Valoriser l'Agriculture et le Milieu rural	OGM : Organisme Génétiquement Modifié
CU : Coefficient d'Uniformité	OMS : Organisation Mondiale de la Sante
DBO5 : Demande Biologique en Oxygène sur 5 jours	ONAS : Office National de l'Assainissement de Tunisie
DCE : Directive Cadre sur l'Eau	ORS : Observatoire Régional de Santé d'Ile-de-France
DCO : Demande Chimique en Oxygène	P : Pression
DDASS : Direction Départementale des Affaires Sanitaires et Sociales	Pe : Pression en entrée
DGS : Direction Générale de la Sante	Ps : Pression en sortie
EA : Exploitation Agricole	PB : Produit Brut
EBE : Excédent Brut d'Exploitation	Q : Débit
EDCH : Eau Destinée a la Consommation Humaine	Q.m. : Débit moyen
EH : Equivalent / Habitant	Q.n. : Débit nominal
EMLT : Emprunt à Moyen et Long Terme	REUT : Réutilisation des Eaux Usées Traitées
ETM : Eléments Traces Métalliques	SATESE : Syndicat d'Assistance Technique pour l'Epuration et le Suivi des Eaux
EUT : Eaux Usées Traitées	SEM : Société des Eaux de Marseille
FAO : Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture	STEP : STation d'EPuration
FNCIVAM : Fédération Nationale des Centres d'Initiatives pour Valoriser l'Agriculture et le Milieu rural	SWOT : Strengths Weaknesses Opportunities and Threats
GMS : Grandes et Moyennes Surfaces	TI : Taux d'Importation
HAP : Hydrocarbures Aromatiques Polycycliques	TV : Traitements Vétérinaires
IAA : Industries Agro-Alimentaires	UF : Ultra Filtration
	US-EPA : United States Environmental Protection Agency
	USAID : United States Agency of International Development
	UTH : Unité de Travail Humain
	UV : Ultra-Violet
	VA : Valeur Ajoutée

Table des matières

REMERCIEMENTS	3
RESUME	4
ABSTRACT	4
LISTE DES SIGLES ET ACRONYMES	5
TABLE DES MATIERES	6
TABLE DES FIGURES	9
TABLE DES TABLEAUX	9
INTRODUCTION	10
PARTIE I : PRESENTATION DE L'ETUDE COMMANDEE PAR L'ORGANISME D'ACCUEIL	11
I. PRESENTATION DU CONTEXTE GENERAL DE L'ETUDE	11
I.1. Irrigation et changements climatiques	11
I.2. L'eau en agriculture : un débat politique actuel	11
I.3. Le laboratoire LERMI au cœur de cette problématique	11
I.4. Etat des lieux de la REUT agricole en France : Une activité délicate peu répandue et méconnue	12
I.4.1. Qu'est-ce que la Réutilisation des Eaux Usées Traitées (REUT) ?	12
I.4.2. Répartition et caractérisation générale des projets de REUT en France	12
I.4.3. Une diversité des situations qui rend difficile une approche générale des projets	13
I.5. Un contexte réglementaire qui se met en place	13
I.5.1. Détermination des différents niveaux de qualité des EUT et de leurs conditions d'utilisation	14
I.5.1.1. Identification des risques liés à la REUT	14
I.5.1.1.1. Risques physico-chimiques	14
a) Les éléments traces métalliques (ETM)	14
b) Les composés organiques	14
I.5.1.1.2. Risques microbiologiques et données épidémiologiques	14
a) Risques pour l'homme	14
b) Risques pour les animaux	14
I.5.1.2. Valeurs limites de qualité	14
I.5.1.2.1. Contraintes de distance	15
I.5.1.2.2. Contraintes d'usage	15
a) Quel niveau de qualité pour quelle culture ?	15
b) Adaptation des matériels d'irrigation	16
I.5.1.2.3. Contraintes de surveillance	16
a) Surveillance des eaux usées traitées et de la qualité des sols	16
b) Surveillance de l'irrigation et de la production	17
I.5.2. Lacunes à combler	17
I.5.2.1. Prise en compte de certains impacts de la REUT	17
I.5.2.1.1. Sur les matériels d'irrigation	17
I.5.2.1.2. Prise en considération des impacts non-économiques de la REUT	17
I.5.2.2. Etude de faisabilité technico-économique des projets de REUT	17
II. PROBLEMATISATION DE L'ETUDE	18
II.1. Caractérisation des cibles et détermination des échelles d'étude	18
II.2. Atouts, contraintes, opportunités et menaces	18
II.3. Objectifs généraux et spécifiques	19
II.4. Enjeux de l'étude	19
II.4.1. Enjeux pour le Cemagref	19
II.4.2. Enjeux pour les différents acteurs de la REUT	19
PARTIE II : ESTIMATION DES EFFETS DIRECTS ET INDIRECTS DE LA REUTILISATION DES EAUX USEES TRAITÉES EN IRRIGATION AGRICOLE	21
I. PRESENTATION DE LA METHODOLOGIE UTILISEE POUR L'ESTIMATION DES EFFETS DE LA REUT	21
I.1. Hypothèses d'étude	21
I.2. Inventaire des effets	21
I.3. La méthode ACB : Comment évaluer les différents effets répertoriés ?	22
I.3.1. Qu'est-ce que l'ACB ?	22
I.3.1.1. Quelques définitions... (ICRA, 2007)	22

I.3.1.2.	Prise en compte de la valeur économique de l'environnement.....	23
I.3.2.	Une méthode qui présente quelques lacunes à combler.....	23
I.3.2.1.	Une méthode qui ne présente qu'une image partielle du projet.....	23
I.3.2.2.	Une méthode sujette à la variabilité des coûts d'un projet de REUT.....	24
I.3.2.3.	Complexité de la méthode dû aux interdépendances des différents effets répertoriés.....	24
II.	ESTIMATION DES EFFETS ECONOMIQUES DE LA REUT.....	24
II.1.	<i>Eléments constitutifs du coût total d'un projet de REUT.....</i>	24
II.1.1.	Coûts relatifs à l'étude préalable.....	24
II.1.2.	Coûts relatifs au système épuratoire.....	25
II.1.2.1.	L'investissement en traitement tertiaire.....	25
II.1.2.2.	Les frais de fonctionnement : Un coût d'exploitation variable selon les traitements.....	25
II.1.2.3.	Contrôle de la qualité des eaux en sortie de traitement : Mesure de l'efficacité de traitement.....	26
II.1.3.	Coûts relatifs au système d'irrigation.....	26
II.1.3.1.	Coûts des infrastructures d'irrigation.....	26
II.1.3.2.	Durée de vie des équipements d'irrigation et maintenance.....	26
II.1.3.2.1.	Estimation de la valeur actuelle des équipements.....	26
II.1.3.2.2.	Durées de vie.....	27
II.1.3.3.	Coût du réseau d'adduction.....	27
II.1.3.4.	Coûts de stockage.....	27
II.1.3.5.	Coûts d'installation de chantier et coûts annexes.....	28
II.1.3.6.	Les frais de fonctionnement.....	28
II.2.	<i>Evaluation des bénéfices économiques de la REUT.....</i>	28
II.2.1.	Gain sur les coûts en intrants.....	28
II.2.2.	Gain de productivité.....	28
II.2.3.	Les subventions.....	29
II.2.4.	Economie du prélèvement de l'eau brute de surface.....	29
III.	EVALUATION DES EFFETS NON-ECONOMIQUES DIRECTS ET INDIRECTS DE LA REUT EN IRRIGATION AGRICOLE.....	30
III.1.	<i>Impacts environnementaux.....</i>	30
III.1.1.	Le risque de salinisation des sols.....	30
III.1.2.	Modifications de la pollution physico-chimique des milieux récepteurs.....	31
III.1.3.	Evolution de la fertilité du sol et gestion de la fertilisation.....	31
III.1.3.1.	Définition de la fertilité du sol.....	31
III.1.3.2.	Impacts de la REUT sur la gestion de fertilisation du sol.....	31
III.1.4.	Contamination bactériologique du sol et des eaux souterraines.....	31
III.2.	<i>Impacts sociaux.....</i>	32
III.2.1.	Représentation et acceptabilité sociale de la REUT en agriculture par le grand public et les professionnels.....	32
III.2.1.1.	La REUT, une activité qui véhicule une image différente suivant le référentiel considéré.....	32
III.2.1.2.	Acceptabilité du risque par le grand public et les professionnels.....	32
III.2.1.3.	Importance de la communication et de la formation.....	33
III.2.1.4.	Impact sur l'image du travail des agriculteurs.....	33
III.2.2.	La création d'emploi.....	33
III.2.3.	Développement du tourisme.....	34
III.2.4.	La modification du paysage.....	34
IV.	PROPOSITION D'UN GUIDE D'ETUDE DE LA FAISABILITE DES PROJETS DE REUT EN IRRIGATION AGRICOLE.....	34
IV.1.	<i>Principaux déterminants techniques des projets de REUT.....</i>	34
IV.2.	<i>La grille d'analyse des coûts et des bénéfices de la REUT.....</i>	35
	PARTIE III : PROPOSITION D'UN MODE D'EVALUATION DE LA DURABILITE DES SYSTEMES.....	37
I.	LA DURABILITE TECHNIQUE DES SYSTEMES D'IRRIGATION LOCALISEE.....	37
I.1.	<i>Evaluation de l'efficacité d'un matériel de micro-irrigation.....</i>	37
I.1.1.	Uniformité d'arrosage à la parcelle.....	37
I.1.2.	Sensibilité des distributeurs au bouchage.....	38
I.1.3.	Pertes de charges.....	38
I.2.	<i>Impacts de la REUT sur la durabilité technique des matériels d'irrigation localisée.....</i>	38
I.2.1.	Présentation du protocole normalisé utilisé.....	38
I.2.1.1.	Objectifs des essais réalisés.....	38
I.2.1.2.	Description des différentes séries d'essais.....	39
I.2.1.3.	Conditions d'expérimentation.....	39
I.2.1.4.	Suivi des essais.....	39
I.2.2.	Présentation et interprétation des résultats.....	40
I.2.2.1.	Présentation, interprétation et discussion des résultats des essais réalisés.....	40
I.2.2.1.1.	Analyse globale du fonctionnement du dispositif expérimental.....	40
a)	Evolution du débit moyen en fonction du temps de fonctionnement.....	40
b)	Analyse de la variabilité des débits moyens en fonction du temps de fonctionnement.....	40
c)	Comparaison entre les volumes relevés aux compteurs et les volumes reconstitués à partir des mesures au niveau des goutteurs.....	41

I.2.2.1.2.	Evolution des coefficients d'uniformité (CU) par ligne.....	41
I.2.2.1.3.	Evolution des débits moyens au cours du temps	41
I.2.2.1.4.	Evolution des débits en fonction de la position du goutteur	41
I.2.2.1.5.	Variations des pertes de charges au cours du temps	42
I.2.2.2.	Conclusions et recommandations pour les futurs essais.....	42
I.2.2.3.	Evaluation des dépenses de maintenance comme indicateur de durabilité technique	43
II.	ESTIMATION DE LA DURABILITE AGRO-ECOLOGIQUE, SOCIO-TERRITORIALE ET ECONOMIQUE DES SYSTEMES ETUDIES	43
II.1.	<i>Méthodologie adoptée pour la détermination des indicateurs de durabilité</i>	43
II.1.1.	Quelques définitions	44
II.1.1.1.	Qu'est-ce que la méthode IDEA ?	44
II.1.1.2.	Définition d'un indicateur.....	44
II.1.2.	Comment déterminer les indicateurs de durabilité ?.....	44
II.1.2.1.	Construction et sélection des indicateurs de durabilité	44
II.1.2.2.	Adaptation des barèmes de notation	45
II.2.	<i>Présentation des critères de durabilité agro-écologique (IDEA)</i>	45
II.2.1.	Diversité culturelle	45
II.2.2.	Organisation de l'espace	45
II.2.3.	Pratiques agricoles	46
II.3.	<i>Présentation des critères de durabilité socio-territoriale</i>	46
II.3.1.	Qualité des produits et du territoire	46
II.3.2.	Emplois et services	47
II.3.3.	Ethique et développement humain.....	47
II.4.	<i>Présentation des critères de durabilité économique</i>	48
II.4.1.	Viabilité économique.....	48
II.4.1.1.	Viabilité économique (VE)	48
II.4.1.2.	Taux de spécialisation économique.....	48
II.4.2.	Indépendance.....	48
II.4.3.	Efficiencia du processus productif.....	49
	CONCLUSION ET PERSPECTIVES	50
	BIBLIOGRAPHIE	51

Table des figures

FIGURE 1 : CYCLE D'ASSAINISSEMENT DES EAUX.....	12
FIGURE 2 : FRAIS DE FONCTIONNEMENT DE L'ASA LIMAGNE NOIRE.....	26
FIGURE 3 : PRINCIPAUX DETERMINANTS TECHNIQUES DE LA FAISABILITE DES PROJETS DE REUT.....	35
FIGURE 4 : ORGANIGRAMME DE LA DEMARCHE ADOPTEE POUR LA CONSTRUCTION DES INDICATEURS DE DURABILITE.....	44

Table des tableaux

TABLEAU 1 : LES PARAMETRES VARIANT D'UN PROJET DE REUT A L'AUTRE.....	13
TABLEAU 2 : LES CONTRAINTES D'USAGE EN FONCTION DU NIVEAU DE QUALITE DE L'EAU.....	15
TABLEAU 3 : PROGRAMME DE SURVEILLANCE DE LA QUALITE DES EUT ET DES SOLS.....	16
TABLEAU 4 : CARACTERISATION DES ACTEURS DE LA REUT, CIBLES DE L'ETUDE.....	18
TABLEAU 5 : PRESENTATION DES OBJECTIFS DE L'ETUDE.....	19
TABLEAU 6 : PRESENTATION DES DIFFERENTS EFFETS ECONOMIQUES ET NON-ECONOMIQUES, DIRECTS ET INDIRECTS DE LA REUT EN IRRIGATION AGRICOLE.....	22
TABLEAU 7 : PRESENTATION DES IMPACTS POSITIFS ET NEGATIFS DE LA REUT A L'ECHELLE DES AGRICULTEURS.....	22
TABLEAU 8 : COUT DES ANALYSES DE SOL.....	25
TABLEAU 9 : ESTIMATION DES COUTS D'EXPLOITATION DES PROCEDES DE DESINFECTION POUR LA REUT.....	25
TABLEAU 10 : COUTS LIES AU RESEAU D'ADDUCTION SELON LES PRIX PRATIQUES PAR LE CABINET MERLIN.....	27
TABLEAU 11 : QUANTITE DE SUBSTANCES NUTRITIVES APPOREE A L'HECTARE.....	31
TABLEAU 12 : MESURES A PRENDRE POUR AUGMENTER L'ACCEPTABILITE DE LA REUT PAR LE PUBLIC.....	33
TABLEAU 13 : PRESENTATION DES CARACTERISTIQUES DES DIFFERENTES LIGNES D'ESSAIS.....	39
TABLEAU 14 : INDICATEURS DU DOMAINE DE LA DIVERSITE.....	45
TABLEAU 15 : INDICATEURS DU DOMAINE DE L'ORGANISATION DE L'ESPACE.....	45
TABLEAU 16 : BAREME D'EVALUATION DE L'INDICATEUR « TRAITEMENTS VETERINAIRES ».....	46
TABLEAU 17 : INDICATEURS DU DOMAINE DES PRATIQUES AGRICOLES.....	46
TABLEAU 18 : INDICATEURS RELATIFS A LA QUALITE DES PRODUITS ET DU TERRITOIRE.....	46
TABLEAU 19 : INDICATEURS RELATIFS AUX EMPLOIS ET AUX SERVICES.....	47
TABLEAU 20 : INDICATEURS RELATIFS A L'ETHIQUE ET AU DEVELOPPEMENT HUMAIN.....	47
TABLEAU 21 : BAREME D'EVALUATION DU CRITERE « SENSIBILITE AUX AIDES ».....	48

Introduction

Le monde agricole se trouve aujourd'hui confronté à un paradoxe. En effet, il lui revient la mission de nourrir une planète dont la démographie est en constante croissance, dans un contexte de diminution des ressources en eau, en sol et en énergie et de sensibilité environnementale grandissante.

La France, qui possède des réserves en eau importantes, semble favorisée. Cependant, nos ressources sont inégalement réparties et limitées ; les sécheresses de ces dernières années l'ont particulièrement mis en évidence. Cette raréfaction des ressources en eau et la dégradation de leur qualité va positionner la préservation des réservoirs d'eau et la diminution des prélèvements dans le milieu naturel comme un des défis majeurs du XXI^{ème} siècle (politiques, économiques, stratégiques, etc.). Différentes mesures politiques sont prises dans ce sens.

L'agriculture française, grande consommatrice d'eau, est la première visée par la loi sur l'eau. Elle impose une diminution des prélèvements destinés à l'irrigation de parcelles agricoles, mettant bon nombre de régions à rude épreuve (pourtour méditerranéen, région Poitou-Charentes). L'eau constitue en effet, pour ces zones, un facteur de production indispensable à la sécurisation des récoltes tant en quantité (rendement) qu'en qualité. Certains contrats de production ne sont d'ailleurs délivrés que si l'irrigation est possible.

Dans ce contexte, et afin de limiter la vulnérabilité de l'agriculture au manque d'eau, il convient de chercher des approvisionnements alternatifs. La Réutilisation des Eaux Usées Traitées (REUT) peut constituer l'une de ces solutions. La France, qui vient seulement de se doter d'une réglementation, présente un retard dans ce domaine, par rapport à ses voisins européens (Italie, Espagne, Chypre, Allemagne, etc.).

Le présent document est le résultat d'un travail effectué de juin à novembre 2010, au sein du Laboratoire d'Etudes et de Recherche sur le Matériel d'Irrigation (LERMI) du Cemagref d'Aix-en-Provence. Ce travail contribue à la recherche en matière de REUT dans le domaine agricole, ainsi qu'à sa valorisation. Il s'inscrit dans la continuité de projets entamés par le Cemagref, dont notamment une étude réalisée par des étudiants d'AGROSUP DIJON qui a permis de souligner les paramètres déterminants pour la mise en place de projets de REUT.

L'objectif de ce travail est de développer un guide d'étude de la faisabilité technique et économique des projets de REUT en irrigation agricole, et de proposer, à terme, un outil d'aide à la décision pour la mise en place et la gestion de projets de REUT, sous forme d'une note de calcul sommaire. L'étude se base sur une identification des coûts et des bénéfices directs et indirects de la REUT, afin d'évaluer la faisabilité et la possible rentabilité des projets. Elle vise également à lister et à approcher plus finement les indicateurs techniques, économiques, sociaux et environnementaux à prendre en compte dans un projet de REUT. Il s'agit notamment d'estimer les conséquences à moyen et long termes de la REUT et ainsi d'évaluer son impact sur la durabilité des exploitations agricoles.

Le travail réalisé a consisté tout d'abord en une étude bibliographique, précisant le contexte et le cadre de l'étude, ayant permis de souligner la complexité des relations entre les différents effets induits par la REUT. Des enquêtes auprès de différents professionnels de la REUT (notamment en matière d'irrigation, d'épuration et de développement durable) ont permis de valider les paramètres et indicateurs retenus. Des expérimentations sur le terrain ont été entamées en parallèle de ce travail. Un travail d'analyse et de synthèse des premiers résultats nous a permis d'estimer les impacts techniques de la REUT sur les systèmes d'irrigation localisée, pour à terme proposer des recommandations techniques en vue d'optimiser la REUT en irrigation agricole.

PARTIE I : Présentation de l'étude commandée par l'organisme d'accueil

I. Présentation du contexte général de l'étude

I.1. Irrigation et changements climatiques

Le réchauffement climatique, qui fait ... se traduit par une irrégularité croissante des précipitations durant la saison de culture, conduisant à la création des déficits hydriques importants aux moments critiques de la croissance des cultures. Il apparaît ainsi légitime de se demander, si la ressource eau ne peut pas devenir une limite au développement du secteur agricole.

Un groupe de travail a été chargé par le gouvernement français d'évaluer les potentiels effets des changements climatiques en France, à court et à long termes, sur dix secteurs d'activité (agriculture, forêts, énergie, industrie, etc.). Les conclusions sont formelles, en considérant une stabilité de la demande en eau, on observerait un déficit de 2 milliards de m³/an à l'horizon 2050, pour la satisfaction des besoins actuels de l'environnement, de l'industrie, de l'agriculture et de l'alimentation en eau potable. L'adaptation au changement climatique doit donc passer par une meilleure gestion de la consommation d'eau dans chacun des secteurs considérés et lorsque cela est possible, par la mobilisation de ressources alternatives. (CONSOGLOBE, 2009)

Les prélèvements en eau représentent en France 24%¹ de la ressource annuelle disponible. L'irrigation, avec 12%, est le troisième consommateur d'eau douce en France. La répartition des prélèvements d'eau par usage est présentée en annexe (cf. Annexe 1). Parmi ces 24% prélevés, 49% ont été consommés par l'agriculture, via l'irrigation (cf. Annexe 2). Cette consommation agricole a connu un accroissement rapide, les surfaces irriguées ayant pratiquement quadruplé entre 1970 et 1997.

Au regard de ces changements globaux et de leurs conséquences, des économies d'eau sont nécessaires dans le secteur agricole. Par exemple, des économies sont possibles en privilégiant les cultures peu gourmandes en eau, en améliorant l'efficacité des systèmes d'irrigation, ou encore en utilisant des ressources en eau non-conventionnelles telles que les EUT.

I.2. L'eau en agriculture : un débat politique actuel

La nouvelle loi sur l'eau et sa réforme des prélèvements pour l'irrigation est désormais basée sur des volumes déterminés pour chaque exploitation et alloués par une autorité de gestion locale. Cette législation rencontre une forte opposition dans certaines régions où l'irrigation est une pratique stratégique.

En effet, l'eau constitue un des facteurs essentiels pour la production agricole. Cette ressource est garante de la régularité de la production, de sa quantité et de sa qualité. Or, les baisses annoncées des volumes alloués à l'irrigation (jusqu'à 70% voire 100% dans certains bassins) auront un fort impact sur les différentes filières agricoles. Cette nouvelle contrainte technique et économique est difficilement acceptable pour les agriculteurs. Ils souhaitent la mise en place de plans concertés, adaptés aux besoins de chaque sous-bassin, sans écartier la création de ressources en eau garantissant les usages agricoles sur la base de ses besoins de consommation et répondant aux attentes des autres consommateurs (C. D'HALLOY 2010). Le recours à des ressources non-conventionnelles apparaît comme une alternative possible, permettant aux agriculteurs de diminuer la pression qu'ils exercent sur les ressources en eau douce de bonne qualité.

I.3. Le laboratoire LERMI au cœur de cette problématique

Le laboratoire LERMI constitue l'une des cinq unités de recherches du Cemagref d'Aix-en-Provence. Le Cemagref est un organisme de recherche spécialisé en sciences et technologies pour l'environnement. Il fonde sa stratégie sur une double compétence dans les domaines de l'eau et des agro-procédés. L'équipe du LERMI conduit ses travaux dans le domaine des performances des matériels et des systèmes d'irrigation, de l'échelle de la parcelle jusqu'à la petite région agricole. Les activités de l'équipe ont pour objectif une meilleure maîtrise de l'irrigation à l'échelle de la parcelle *via* l'amélioration de la qualité des matériels et de leurs performances de distribution.

¹ Ce pourcentage est comparable à celui d'autres grands pays européens : Allemagne (25%), Espagne (29%) et Italie (32%). En revanche, l'Irlande, la Suède et la Norvège ne prélèvent que 2% de leurs ressources disponibles.

Les travaux initialement centrés sur les seules eaux agricoles s'étendent, depuis quatre ans, aux eaux usées plus ou moins traitées et à leur réutilisation. Le laboratoire d'Aix-en-Provence participe à de nombreuses études en vue d'apporter des compléments notamment sur des aspects technico-économiques de la REUT pour l'irrigation agricole. En parallèle, les aspects sociaux commencent à être étudiés, en particuliers dans les zones de fortes pénuries.

L'activité de coopération avec les pays méditerranéens et la participation à différentes instances internationales permettent au LERMI de maintenir un lien fort avec les différents organismes qui contribuent à l'amélioration des techniques et des pratiques d'irrigation dans le monde. Par ailleurs, le Cemagref occupe une place originale dans le dispositif de la recherche française, puisqu'il est situé à l'interface entre la recherche fondamentale, les pouvoirs publics et les utilisateurs (publics ou privés). Cela se traduit par des partenariats multiples et diversifiés, qui garantissent une pratique de la recherche basée sur des questions concrètes. Ces quelques caractéristiques constituent des atouts considérables pour mener à bien leur activité de recherche et de valorisation de la REUT.

I.4. Etat des lieux de la REUT agricole en France : Une activité délicate peu répandue et méconnue

La REUT laisse entrevoir de nombreuses perspectives en France, mais les études étaient bloquées en attente de publication d'un cadre réglementaire, publié en Août 2010. En conséquence, seuls quelques projets avec autorisation spéciale et accompagnés d'un suivi rigoureux durant les premières années ont pu voir le jour. Une liste de ces projets a été dressée et leur localisation a été reportée sur la carte située en Annexe 3.

I.4.1. Qu'est-ce que la Réutilisation des Eaux Usées Traitées (REUT) ?

Les eaux usées sont les eaux rejetées par les collectivités et les industries qui sont acheminées vers une station d'épuration (STEP). Dans le cycle conventionnel d'assainissement (cf. Figure 1), ces eaux usées brutes sont traitées pour retourner ensuite dans le milieu naturel (dit milieu récepteur) débarrassée d'une bonne part de leur charge polluante. La Réutilisation des Eaux Usées Traitées (REUT) consiste à récupérer ces eaux usées épurées, éventuellement de finir leur épuration par un traitement tertiaire (lagunage, filtration, traitement UV, ozonation, chloration, etc.) et de s'en servir pour de nouveaux usages (agricole, urbain, industriel).

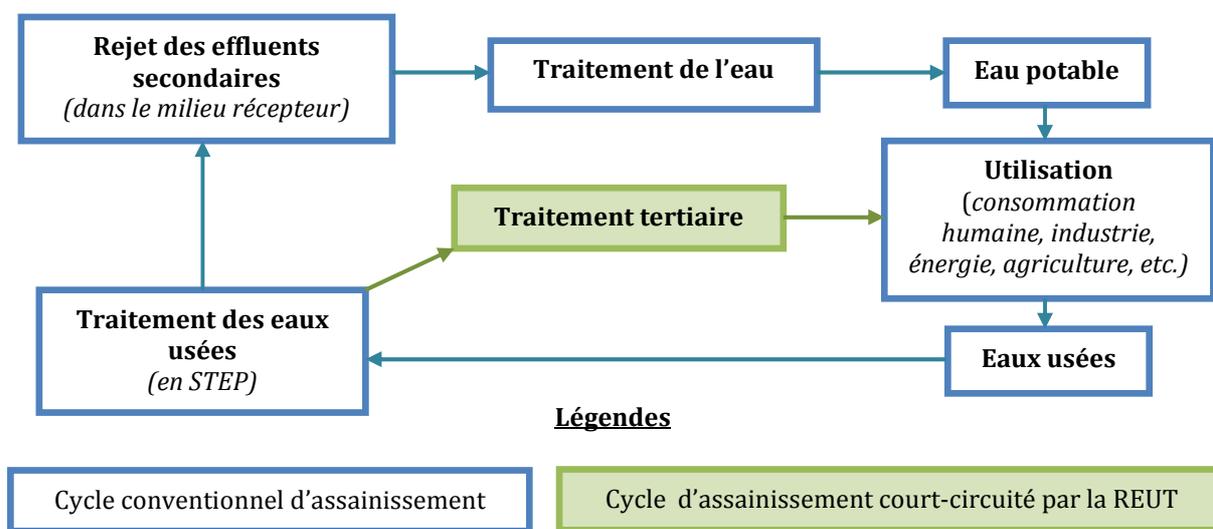


Figure 1 : Cycle d'assainissement des eaux.

Source : (BAUMONT, 2004)

Ainsi, en modifiant le cycle conventionnel d'assainissement (cf. Figure 1), la REUT peut agir à deux niveaux :

- Elle évite les rejets d'EUT dans le milieu récepteur, évitant ainsi de déployer des efforts pour potabiliser une eau issue du milieu naturel en aval d'une collectivité.
- Elle représente une ressource en eau supplémentaire venant en substitution d'une ressource de meilleure qualité plus facile à potabiliser par exemple.

I.4.2. Répartition et caractérisation générale des projets de REUT en France

L'Erreur ! Source du renvoi introuvable. répertorie les différents projets français de REUT identifiés en 2010. Ont été recensés : les projets aboutis, les projets abandonnés et les projets en cours. On observe ainsi, en France, une concentration des projets de REUT sur les côtes Sud et Ouest du pays : côtes des régions PACA et

Languedoc-Roussillon pour le Sud, et côtes des régions Normandie, Bretagne, Pays de la Loire, Limousin-Poitou-Charente et Aquitaine pour l'Ouest et le Sud-Ouest.

Cette disposition est à rapprocher du contexte naturel de ces régions : demande climatique estivale forte, (sud) absence ou faiblesse des ressources naturelles (grand ouest), ou des situations spécifiques comme l'absence de nappe ou de cours d'eau proche comme en Limagne. Pour les autres régions de France le niveau peu élevé du stress hydrique conduit à une demande en eau généralement inférieure à la quantité disponible, ainsi qu'à une qualité de la ressource en eau qui ne limite pas son usage. (MEDITERRANEAN WASTEWATER REUSE WORKING GROUP, 2007). Cependant, la formalisation récente de la demande environnementale (suite du Grenelle) et les caprices du climat (ou son évolution) font craindre pour les années qui viennent une plus forte hétérogénéité des précipitations. Pour preuve, début août 2010, cinquante départements étaient en alerte sécheresse, dont certains avec des niveaux équivalents à la situation de 1976 qui avait marqué les esprits.

1.4.3. Une diversité des situations qui rend difficile une approche générale des projets

Lors du précédent travail conduit par HUARD, QUILY et SORNAY (2010), des enquêtes auprès des gestionnaires de sites de REUT en France, complétées par une bibliographie des sites d'autres pays Européens ou non, ont permis de souligner la difficulté d'établir une typologie des projets de REUT. Ce travail a en effet mis en évidence une variation importante de certains paramètres d'un projet à l'autre, comme l'illustre le Tableau 1, influant à la fois sur l'aspect technique et organisationnel de ce dernier.

Paramètre variant	Conséquences
Institutions consultées (en charge de la décision d'agrément, etc.) <i>(préfecture, commune, DDASS, Agence de l'eau, etc.)</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Périmètre d'actions et limites de l'agrément - Origine des fonds débloqués <i>(subventions, etc.)</i>
Caractéristiques environnementales du site <i>(topographie, pédologie, climat, parcellaire, etc.)</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Aménagements à réaliser et remembrement - Procédures à suivre - Sensibilité et protection du milieu
Commanditaires <i>(agriculteurs, collectivités, etc.)</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Démarches administratives à suivre - Délais - Financements des projets
Localisation du site <i>(proximité du public, type de fréquentation, etc.)</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Périmètre de protection rapprochée - Sensibilité du milieu (qualité et quantité de ressource) - Type d'irrigation (en fonction du type de production) - Niveau de qualité des EUT
Infrastructures existantes ou non	<ul style="list-style-type: none"> - Construction d'installations supplémentaires <i>(aménagements pour le traitement tertiaire, bassins de stockage, réseau de distribution de l'eau, etc.)</i> - Coûts financiers engendrés proportionnés aux bénéfices = Frein dans l'entreprise d'un projet de REUT <i>(notamment pour les agriculteurs initiateurs)</i>

Tableau 1 : Les paramètres variant d'un projet de REUT à l'autre.
Source : Elaboré à partir des données recueillies dans (HUARD, QUILY et SORNAY, 2010).

1.5. Un contexte réglementaire qui se met en place

La réglementation française relative à la REUT est récente, elle s'inspire des recommandations de l'OMS et de l'expérience de la législation sur les boues d'épuration, en attendant de développer une expérience nationale significative.

Deux principaux textes français sont à l'origine de l'arrêté d'août 2010: les recommandations du Conseil Supérieur d'Hygiène Publique de France (CSHPF) de 1994 et un avis de l'Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments (AFSSA) publié en 2009. L'arrêté a été publié pour une période de test de 2 ans au cours de laquelle elle doit être évaluée pour le cas de la pratique de l'aspersion.

Cet arrêté fixe du point de vue sanitaire les prescriptions techniques, les modalités de mise en œuvre et de surveillance applicables à la REUT. Il est précisé que la REUT est praticable pour l'arrosage des espaces verts et l'irrigation des cultures, des pâturages et des cultures fourragères, quelle que soit la méthode d'application (aspersion, gravitaire ou goutte-à-goutte).

Au sens de l'arrêté du 2 août 2010, sont considérées comme Eaux Usées Traitées (EUT) : les eaux usées issues des stations d'épuration, celles issues des installations d'assainissement non-collectif et dont la charge brute de pollution organique est supérieure à 1,2 kg DBO5/jour (soit 20 EH).

I.5.1. Détermination des différents niveaux de qualité des EUT et de leurs conditions d'utilisation

I.5.1.1. Identification des risques liés à la REUT

I.5.1.1.1. Risques physico-chimiques

A la lumière de nombreuses études comparatives entre EUT et boues d'épuration, on a identifié deux contaminants principaux, présentant un risque pour les humains, les animaux et l'environnement : les éléments traces métalliques (ETM) et les composés organiques. Les risques liés aux sels sont traités plus loin.

a) Les éléments traces métalliques (ETM)

Les EUT peuvent à long terme présenter le risque d'une accumulation d'ETM dans les sols. Les éléments qui ont été retenus pour une surveillance sont ceux de la réglementation des épandages de boues : Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn, Se. Ces ETM seront suivis dans les EUT lors de l'étude préalable de mise en place du projet pour estimer leur flux. Ce suivi sera ensuite effectué en routine lors de l'irrigation des parcelles, en lien avec la mesure des ETM dans les boues. (AFSSA, 2008)

Il faut noter que les STEP de plus de 2 000 EH effectuent ce type de suivi en routine. Pour les expériences de REUT, il a été évoqué la possibilité de mettre en place un suivi rapproché au départ puis qui s'espace dans le temps si on ne trouve aucun des ETM cités.

b) Les composés organiques

Les molécules impliquées sont nombreuses et de natures diverses. Les molécules les plus hydrophiles persistent dans les EUT et certaines peuvent s'accumuler dans les sols. Les données d'impacts sanitaires sont peu nombreuses, compte tenu des faibles concentrations et de la faible migration de ces molécules vers les aliments, les risques sont jugés faibles. Les risques pour les écosystèmes terrestres sont encore peu connus, en particulier ceux liés aux produits de dégradation des composés organiques. Néanmoins des projets de suivi de certains dérivés de substances médicamenteuses, à l'origine de perturbation de la faune des rivières, sont à l'étude.

I.5.1.1.2. Risques microbiologiques et données épidémiologiques

a) Risques pour l'homme

Les prescriptions du projet d'arrêté relatif à la réutilisation d'EUT proposent le suivi de l'indicateur *E. coli*. Il est également proposé de rechercher les salmonelles, en tant que bactéries pathogènes. Les œufs de *Tænia* sont retenus pour représenter les parasites. Aucune analyse portant sur des virus pathogènes ou sur des indicateurs viraux n'est suggérée (BAUMONT, 2004). Les principaux micro-organismes pathogènes présents dans les eaux usées de France métropolitaine sont : salmonelles, shigelles, campylobactéries, *E. Coli* entéropathogènes, virus entériques, *Cryptosporidium* sp et *Giardia intestinalis*. (cf. Annexe 4)

b) Risques pour les animaux

Le risque de contamination des animaux va principalement dépendre de l'origine des eaux usées. Les eaux usées d'origine urbaine véhiculent principalement des agents pathogènes d'origine humaine et, en plus faible quantité, d'animaux de compagnie. Or, aucun virus d'origine humaine, canine ou féline n'affecte les ruminants et les équidés. Il en va de même pour les souches humaines d'*E. Coli*. Concernant les parasites éventuellement présents dans ces eaux usées, on en dénombre trois principaux : les œufs de *Tænia spp.* ainsi que les oocystes de *Cryptosporidium spp.* et de *Toxoplasma gondii*. Quant aux bactéries pathogènes, les plus fréquemment isolées sont : *Salmonella spp.*, *Listeria monocytogenes*, *Yersinia enterocolitica*. (AFSSA, 2008)

Les principaux dangers pour les animaux découlent en fait des eaux usées industrielles provenant d'établissements agro-alimentaires, en particulier des abattoirs et des établissements d'équarrissage. La présence de telles entreprises reliées au réseau interdit la REUT de l'effluent traité en aval. (cf. Annexe 5)

I.5.1.2. Valeurs limites de qualité

L'identification des différents risques induits par la REUT en irrigation des espaces verts, des pâturages et des parcelles agricoles alimentaires, a permis d'établir quatre catégories de qualités des EUT. Les caractéristiques détaillées de ces eaux sont présentées à l'Annexe 6. En conséquence, pour chaque projet, les conditions d'épuration et les modalités d'irrigation ou d'arrosage requises, ainsi que les programmes de surveillance à mettre en œuvre, sont définis, après avis de l'ANSES et de la mission interministérielle de l'eau, par un arrêté du ministre chargé de la santé, du ministre chargé de l'environnement et du ministre chargé de l'agriculture ». (LEGROUX, 2010). En cas de dépassement d'une valeur limite fixée par le présent arrêté, l'exploitant de la station d'épuration doit informer immédiatement les exploitants des parcelles irriguées, le préfet et les maires concernés. Il doit également préciser les causes du dépassement constaté et les actions correctives mises en œuvre ou envisagées. L'irrigation est alors interdite jusqu'à transmission au préfet des résultats d'analyses conformes aux valeurs limites.

I.5.1.2.1. *Contraintes de distance*

Pour les eaux souterraines, le risque est lié à l'absence de maîtrise des apports d'eau, qui peut être à l'origine d'un entraînement des composés solubles (nitrates, produits phytosanitaires...). Ce phénomène concerne surtout les milieux très perméables avec un sol mince. (BAUMONT, 2004) dans des conditions de champs d'infiltration (apports > 300 mm/j) plutôt que de parcelles d'irrigation.

Dans le but de protéger les captages des pollutions accidentelles et ponctuelles, des périmètres de protection rapprochée sont définis. Dans ces périmètres sont interdites toutes les créations de nouvelles activités et l'utilisation de dispositifs d'irrigation à usage agricole. Cette interdiction n'est pas retenue dans le cas où l'irrigation par des EUT est jugée localement plus intéressante sur le plan sanitaire et environnemental que le rejet direct. (AFSSA, 2008)

Les périmètres rapprochés d'eau de surface sont subdivisés en une zone tampon ou sensible (située en berge du cours d'eau ou du plan d'eau) et en une zone complémentaire (située en retrait de la zone tampon). La largeur de la zone tampon doit être adaptée à la pente. Cet espace doit être mis en prairie ou boisé. Aucune activité productive n'y est tolérée notamment les apports en fertilisants et en produits phytosanitaires. Enfin l'implantation de dispositifs d'irrigation est uniquement autorisée au niveau de la zone complémentaire². (BAUMONT, 2004 et AFSSA, 2008)

Au regard de la protection des cours d'eau, l'irrigation n'est donc possible qu'en zone complémentaire du périmètre de protection et avec des eaux de qualité A ou B. La qualité de l'eau utilisée dépend alors de la nature du terrain et de la distance entre la zone irriguée et le cours d'eau. Si la pente du terrain est supérieur à 7%, l'irrigation est interdite sauf si celle-ci est localisée (goutteurs ou rampes perforées au voisinage de la plante). En zone karstique, la pente doit se limiter à 3%. (BAUMONT, 2004 et AFSSA, 2008) Pour plus de précisions, veuillez vous référer à l'Annexe 8.

I.5.1.2.2. *Contraintes d'usage*

a) *Quel niveau de qualité pour quelle culture ?*

Les niveaux de qualité à respecter en fonction de la nature et du type de culture envisagée figurent dans le Tableau 2 ainsi que les modes d'irrigation requis.

Il est à noter, que l'irrigation des cultures fourragères réduit le risque de contamination des animaux d'élevage si ces cultures sont utilisées sous forme de foin ou d'ensilage. Ce risque peut être dans ce cas estimé comme nul ou négligeable, même lors d'utilisation d'eaux de qualité B ou C. En revanche, pour la distribution de fourrage en vert, ou au cas où les animaux sont mis à paître sur un champ cultivé après récolte, l'irrigation doit avoir été réalisée avec de l'eau usée traitée de qualité A à moins de respecter, pour les eaux de qualité B, un délai de 10 à 30 jours après la fin de l'irrigation.

Type d'activité	Niveau de qualité			
	A	B	C	D
Cultures maraichères, légumières et fruitières, non-transformées par un traitement thermique industriel adapté	+	-	-	-
Cultures maraichères, fruitières et légumières, transformées par un traitement thermique industriel adapté	+	+	-	-
Pâturage	+	+(1)	-	-
Espaces verts et forêts ouverts au public (notamment golfs)	+(2)	-	-	-
Fleurs vendues découpées	+	+	-	-
Autres cultures florales	+	+	+(3)	-
Pépinières et arbustes	+	+	+(3)	-
Fourrage frais	+	+(1)	-	-
Autres cultures céréalières fourragères	+	+	+(3)	-
Arboriculture fruitière	+	+	+(3)	-
Forêt d'exploitation avec accès contrôlé du public	+	+	+(3)	+(3)

+ : autorisée, - : interdite.

(1) Sous réserve du respect d'un délai après irrigation de 10 jours en l'absence d'abattoir relié à la STEP et de 21 jours dans le cas contraire.

(2) Irrigation en dehors des heures d'ouverture du public.

(3) Uniquement par irrigation localisée.

Tableau 2 : Les contraintes d'usage en fonction du niveau de qualité de l'eau.

Source : (LEGIFRANCE, 2010).

⁶ Zone du périmètre de protection séparant la zone sensible (ou tampon) de la zone où la REUT est autorisée.

b) Adaptation des matériels d'irrigation

Dans le but de limiter les risques de dispersion des aérosols, l'épandage des EUT requiert une adaptation des organes et des matériels d'irrigation par aspersion d'EUT, ainsi que des conditions d'applications : hydrauliques et climatiques.

Dans les zones ventées, il convient ainsi de réduire la prise au vent en utilisant des asperseurs ou des canons dont l'angle d'attaque devra être plus faible (7 à 12° pour les asperseurs et 15 à 21° pour les canons) que ceux proposés pour l'irrigation des cultures (13 à 23° pour les asperseurs et 21 à 27° pour les canons). Par ailleurs si la vitesse du vent ne permet pas de contrôler correctement la répartition de l'eau sur le sol il est conseillé de ne pas arroser. L'expérience du Cemagref en la matière laisse penser qu'une vitesse limite de 3m/s est raisonnable. Enfin, il est recommandé, afin de diminuer le risque de propagation des aérosols induits par l'aspersion des EUT, d'isoler le site d'irrigation par l'implantation d'un rideau d'arbres placé perpendiculairement à la direction des vents dominants, ou en éloignant la zone de REUT de toute zone de passage du public. Ces différents paramètres influant sur la dispersion des aérosols sont en cours de discussion. Le Cemagref vient en effet de terminer une étude portant sur sept modèles d'asperseurs représentatifs de ce qui existe sur le marché.

Le tableau situé en Annexe 7, proposé par l'AFSSA répertorie l'ensemble des adaptations techniques nécessaires à l'irrigation par aspersion des EUT. Ce tableau est en cours de modification à la suite des travaux de recherche spécifiques conduits par le Cemagref.

Il est à noter que le récent arrêté spécifie que « toute utilisation des EUT à des fins d'irrigation par aspersion peut être autorisée à titre expérimental par arrêté préfectoral et après avis favorable de l'Agence Nationale de Sécurité Sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (ANSES) ».

1.5.1.2.3. Contraintes de surveillance

L'arrêté vise la protection de la santé publique et de l'environnement, sous forme de programmes de surveillance des eaux usées traitées, des sols, de l'irrigation et de la production.

a) Surveillance des eaux usées traitées et de la qualité des sols

Il s'agit du suivi de la qualité microbiologique et chimique des EUT ainsi que des paramètres de fonctionnement du procédé de traitement. Les différents contrôles réalisés permettent également une surveillance du nouveau milieu récepteur, c'est-à-dire le sol. Pour chacun des contrôles, une fréquence minimale est établie selon la qualité de l'eau. Les différentes analyses prescrites par le programme de surveillance doivent être réalisées dans un délai tel que les résultats d'analyses sont connus avant le début de la période d'irrigation (LEGIFRANCE, 2010). Le Tableau 3 reprend l'ensemble des contrôles recommandés.

		Contrôles		Fréquence et remarques
Caractéristiques physico-chimique du sol	ETM	Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn		6 mois d'étude de validation du procédé de traitement
	Eléments nutritifs	N, P, K, Na, Mg, Ca		A intégrer dans plan de fertilisation si quantité > 30 kg/ha
	Aptitude du sol à supporter l'irrigation	Vérification de l'absence de dérive ou d'accumulation de sels toxiques dans les sols		Tous les 10 ans <i>Augmentation possible selon les surfaces irriguées, le V_{EUT} utilisé, le dispositif de REUT et la sensibilité des cultures.</i>
Niveau de qualité des EUT	Suivi analytique des E. Coli (1)	A	E. Coli	> 1 analyse/semaine
		B		> 1 analyse/quinzaine
		C et D		> 1 analyse/mois
	Suivi des boues produites lors du traitement des EU (2)	A	MES, DCO, entérocoques fécaux, phages ARN F-spécifiques, spores de bactéries anaérobies sulfitoréductrices, E. Coli	4 analyses/an
		B		
		C et D		

(1) Les prélèvements sont effectués au point d'usage pendant la totalité de la saison d'irrigation. Pour les durées d'irrigation inférieures à 2 mois/an, le nombre d'analyse annuel ne pourra être inférieur à deux.

(2) A l'exception des traitements par lagunage qui font l'objet d'une analyse annuelle dans la lagune finale.

Tableau 3 : Programme de surveillance de la qualité des EUT et des sols.

Source : Elaboré à partir des documents (LEGIFRANCE, 2010) et (BAUMONT, 2004).

b) Surveillance de l'irrigation et de la production

Le programme d'irrigation est transmis au préfet et aux maires concernés, au plus tard un mois avant le début de la campagne d'irrigation (LEGIFRANCE, 2010). Il comprend :

- ◆ La liste et la représentation cartographique des parcelles concernées ;
- ◆ La nature des cultures implantées pendant la période d'irrigation ;
- ◆ L'identification des personnes morales ou physiques intervenant dans la mise en œuvre de l'irrigation ;
- ◆ Le calendrier prévisionnel de l'irrigation et les quantités d'eau par unité culturale en fonction du sol et des cultures ;
- ◆ Le descriptif du matériel utilisé.

Afin d'assurer la traçabilité de ses cultures, l'exploitant de la parcelle irriguée doit également tenir un registre pour informer la commune, l'exploitant de la STEP, l'autorité sanitaire et la police de l'eau. Ce document doit faire état de :

- ◆ La nature des cultures et les parcelles irriguées par les EUT ;
- ◆ Les volumes d'EUT épandues ;
- ◆ Les périodes d'irrigation des parcelles concernées par la REUT ;
- ◆ Les résultats des programmes de surveillance ;
- ◆ Les résultats des analyses des sols.

1.5.2. Lacunes à combler

1.5.2.1. Prise en compte de certains impacts de la REUT...

1.5.2.1.1. Sur les matériels d'irrigation

Les études existantes s'attachent aux aspects risques, agronomie et conséquences pédologiques de la REUT. Les impacts de la REUT sur le matériel d'irrigation sont peu connus. Les différents acteurs de la REUT ne disposent donc d'aucune référence technique en la matière, or du maintien des performances du matériel d'irrigation dépend la durabilité du système de REUT.

Les questions suivantes doivent trouver une réponse : Quels sont les impacts de la REUT à moyen et long termes sur l'état du matériel d'irrigation considéré ? Quelles opérations d'entretien faut-il effectuer afin d'optimiser la durée de vie du matériel d'irrigation utilisé pour la REUT ? Pour quels coûts ? Les recherches en cours au Cemagref ont pour objectif d'apporter des réponses à ces questions. (cf. Partie III.I.)

1.5.2.1.2. Prise en considération des impacts non-économiques de la REUT

D'un point de vue environnemental, rares sont les connaissances relatives au devenir de certaines substances complexes retrouvées dans les EUT dans les sols et de leurs impacts sur les écosystèmes. Les résultats de telles études pourraient permettre d'affiner les valeurs seuils de certains éléments.

Les différentes recommandations établies devraient évoluer dans le futur avec les évolutions techniques des méthodes de traitement des EU et les avancées sur la thématique de la REUT (notamment en ce qui concerne les composés chimiques : leur devenir durant les traitements, leurs transferts dans les chaînes alimentaires, leur toxicité, leur écotoxicité). La parution d'une directive du Parlement européen et du Conseil définissant un cadre pour la protection des sols et de sa mise en œuvre devrait également entraîner une modification des textes. L'objectif principal de cette future directive est de déterminer des mesures visant à limiter les dépôts de substances dangereuses sur le sol suite à l'utilisation d'EUT en irrigation.

1.5.2.2. Etude de faisabilité technico-économique des projets de REUT

Les différents groupes de travail français ont mis en évidence l'intérêt de la définition d'un cadre d'étude de faisabilité des projets de REUT. Il s'agira de quantifier les contraintes de mise en œuvre pour les petites communes rurales, en regard du bénéfice qu'elles pourront en tirer. (AFSSA, 2008)

Les enquêtes réalisées par HUARD, QUILY et SORNAY (2010), auprès d'agriculteurs participant à ou étant à l'origine de projets de REUT, témoignent d'un manque de références technico-économiques en la matière.

En conséquence, le présent travail se propose de traduire les contraintes et atouts évoqués précédemment en propositions techniques opérationnels :

- ◆ Des descriptifs techniques et économiques des filières types, notamment sur les traitements et leur efficacité ;
- ◆ Les modalités des mises en œuvre : caractéristiques de distribution, analyses de l'impact sur le sol et la végétation, maintenance des systèmes...

Ces différents aspects constituent l'objet de notre étude, et seront donc abordés dans les parties qui suivent.

II. Problématisation de l'étude

II.1. Caractérisation des cibles et détermination des échelles d'étude

On distingue quatre populations cibles intéressées par cette étude : les agriculteurs, les collectivités, les professionnels de l'irrigation et les professionnels de l'épuration. Ces acteurs de la REUT ont leur propre échelle de valeurs en fonction de leurs intérêts, leurs responsabilités et leurs contraintes (cf. Tableau 4). Ces éléments permettent d'orienter notre étude dans l'intérêt de chacun.

Cibles	Valeurs	Usages/Intérêts de cette étude
Agriculteurs	Productivité / Sécurisation de la ressource Développement durable Maîtrise des coûts de production Maîtrise du risque	Eléments pour sélectionner des matériels adaptés à la REUT Outil de négociation avec les collectivités autour du service environnemental Valorisation de leur image Nouvelle alternative pour sécuriser l'irrigation
Collectivités	Développement durable Soutien de l'activité économique locale Baisse de la pression sur l'environnement Absence de risque	Valorisation des eaux usées épurées Développement économique local Réduction des impacts environnementaux Valorisation de leur image
Constructeurs (SE + SI)	Innovation Profit Développement durable	Outil de négociation de matériels adaptés à la REUT Valorisation de leur image Recherches et Développements spécifiques

Tableau 4 : Caractérisation des acteurs de la REUT, cibles de l'étude.

A ces différents éléments, il conviendrait d'ajouter la nécessaire évolution vers l'évaluation et la diminution des empreintes eau et carbone des activités humaines comme agricoles. Ces aspects, qui restent à l'état de recherche, ne sont pas abordés ici, mais les éléments de cette étude pourront servir cet objectif.

II.2. Atouts, contraintes, opportunités et menaces

Ce type de projet bénéficie d'atouts qui tendent à se renforcer à mesure que la sensibilité environnementale du public et les manifestations du changement climatique se confirment. L'évolution favorable des mentalités, notamment du fait de la prise de conscience progressive de la nécessité de gérer durablement les ressources est un premier atout majeur. On en voit la manifestation au travers de la volonté politique des municipalités de diminuer leurs impacts, aussitôt relayée par les industriels de l'épuration comme de l'irrigation. L'image du Cemagref dans le milieu professionnel et son réseau de partenaires constituent un atout considérable dans notre étude. (cf. Annexe 9)

La faiblesse du nombre de références nationales du fait que la réglementation n'était pas en place, combinée à la grande diversité des situations rencontrées rendent nécessaires, pour chaque projet, l'actualisation des données, l'analyse détaillée des impacts éventuels des projets comme celle des bénéfices économiques et non-économiques. (cf. Annexe 9)

En matière de risques pour le projet, le principal est celui de ne pas parvenir à accéder et/ou à quantifier de manière réaliste les bénéfices tant économiques que non-économiques. En effet la littérature internationale se concentre essentiellement sur le respect des normes sanitaires, mais finalement assez peu sur les aspects durabilité, comme à l'amélioration de leur image. (cf. Annexe 9)

Les opportunités sont à chercher du côté des réformes politiques à venir concernant les domaines de l'agriculture et notamment de l'irrigation pour baisser la pression sur les ressources inférieure. L'intérêt des constructeurs est avant tout orienté vers la recherche de débouchés leur permettant de valoriser leur capacité d'innovation, alors que les collectivités sont plus sensibles à la baisse de leur empreinte environnementale. (cf. Annexe 9)

Enfin les problèmes d'accessibilité à des données actualisées et généralisables sur les coûts induits par l'activité de REUT en irrigation, de typologie des projets, rendue difficile par la grande diversité des situations, de quantification des bénéfices non-économiques, et de manque de connaissances sur la réponse des matériels d'irrigation à l'utilisation d'eaux de qualité dégradée constituent autant de risques pouvant ralentir le développement de l'activité ou la rendre moins durable.

Il apparaît donc pertinent ...

- ◆ De passer de données économiques anciennes et diversifiées à des données économiques synthétisées, actualisées et complètes.
- ◆ De passer d'une absence de prise en compte des bénéfices non-économiques à une évaluation de ces derniers pour les intégrer à l'évaluation générale d'un projet de REUT.
- ◆ D'intégrer dans l'étude préalablement réalisée (CSP) les aspects technico-économiques directement liés aux matériels d'irrigation choisis.
- ◆ D'assortir l'évaluation des performances des dispositifs techniques des matériels d'une évaluation de leurs performances économiques en tenant compte de l'effet de la baisse de leurs performances sur le comportement du sol.

II.3. Objectifs généraux et spécifiques

L'identification des problématiques de l'étude a permis la définition des différents objectifs à atteindre (cf. Tableau 5). Le travail s'articule autour de trois objectifs généraux déclinés chacun en un ou plusieurs objectifs spécifiques. A partir de ces objectifs, nous avons pu déterminer les différentes missions qu'il serait nécessaire d'effectuer (cf. Annexe 10). Mon planning de travail est consultable en Annexe 11.

Objectifs généraux	Objectifs opérationnels
1. Estimer les enjeux (<i>financiers ou non</i>) directs et indirects de la REUT.	Des fourchettes de coûts et des indicateurs permettant d'évaluer le surcoût de la REUT et les bénéfices non-économiques sont déterminées. Des enquêtes ont été réalisées auprès de professionnels de l'irrigation et de l'épuration, et d'initiateurs de projets de REUT.
2. Créer un cadre pour décrire les références techniques en termes d'efficacité et de durabilités matériels d'irrigation.	Des essais (4 mois d'expérimentation sur site) ont été réalisés à partir d'un protocole normalisé fourni par le Cemagref. Suite à l'analyse des résultats, des prescriptions techniques sont proposées, afin de maximiser la durée de vie des matériels de micro-irrigation.
3. Proposer une méthode d'évaluation de la durabilité des projets de REUT.	Des indicateurs ont été adaptés et/ou élaborés afin de définir l'impact de la REUT sur la durabilité des exploitations agricoles. Les résultats techniques des essais ont été interprétés économiquement.

Tableau 5 : Présentation des objectifs de l'étude.

II.4. Enjeux de l'étude

II.4.1. Enjeux pour le Cemagref

Outre l'avancée de la connaissance de ce nouveau contexte technique, le Cemagref souhaite au travers de cette analyse identifier ses futurs axes de recherche. Notre étude permettra un renforcement du positionnement du Cemagref comme acteur de référence dans le domaine des technologies associées à la REUT en France. Elle sera également l'occasion pour ce centre de recherche de valoriser ses travaux antérieurs sur les performances des matériels d'irrigation, de renforcer sa notoriété et de réaliser des actions d'information et de diffusion de pratiques.

II.4.2. Enjeux pour les différents acteurs de la REUT

Concernant les intérêts des multiples acteurs de la REUT dont notamment les utilisateurs, notre travail va contribuer à constituer des références technico-économiques pour les constructeurs, collectivité, institutions et agriculteurs en matière de REUT agricole. *A posteriori* cette étude pourra servir d'outil de base sur lequel conduire les négociations autour d'un futur projet, contribuant à la transparence de l'ensemble des impacts de la REUT, positifs comme négatifs. De la même manière, ce document pourra aider au développement de l'activité de REUT par l'élaboration de ratios économiques et contribuer à une analyse plus fine des bénéfices

non-économiques. Enfin, les résultats des essais réalisés sur les matériels de micro-irrigation conduiront à la définition de bases de réflexion pour les groupes de travaux chargés de l'évaluation de la législation en matière de REUT agricole.

Conclusion

La réutilisation des eaux usées traitées en irrigation constitue une activité, dont on peut prédire l'expansion, étant donnée la récente mise en place d'un contexte réglementaire définitif. Cependant des lacunes persistent sur la connaissance des impacts directs et indirects (notamment les impacts non-économiques) de la REUT, les interdépendances existant entre chacun d'eux et leur interprétation économique. La durabilité environnementale et socio-économique des systèmes agricoles n'est, elle aussi, pas prise en compte de manière systématique dans les différentes études réalisées jusqu'à aujourd'hui. Le travail accompli ci-après trouve sa justification dans l'amélioration des connaissances et la précision des enjeux pour chacun des acteurs de la REUT.

PARTIE II : Estimation des effets directs et indirects de la Réutilisation des Eaux Usées Traitées en irrigation agricole

Cette partie vient compléter un travail préalablement réalisés par un groupe d'étudiants (HUARD, QUILY et SORNAY, 2010) chargé d'étudier une méthode d'évaluation technico-économique de mise en place d'un projet de REUT en agriculture. L'étude avait pour objectif de lister et d'approcher plus finement les indicateurs techniques, économiques et sociaux à prendre en compte dans un projet de REUT. En d'autres, termes, il s'agissait de définir les paramètres déterminants, pour la mise en place de projets de REUT en irrigation agricole, en France.

Nous nous sommes appuyés sur ce travail pour préciser notamment les données financières et techniques et les actualiser *via* divers contacts réalisés auprès de professionnels de l'irrigation et de l'épuration. Nous nous attacherons à répertorier et à étudier l'ensemble des effets directs et indirects de la REUT, sur les plans économiques, agronomiques, sociaux et environnementaux.

Il est important de préciser ici, qu'il ne s'agit pas d'évaluer financièrement les effets de la REUT en irrigation agricole, mais de les répertorier et de proposer une méthode permettant d'en fournir une estimation. L'objectif final de cette partie est d'approcher la « rentabilité » des projets de REUT, tant sur les points technico-économique, que sur les points sociaux et/ou environnementaux.

I. Présentation de la méthodologie utilisée pour l'estimation des effets de la REUT

I.1. Hypothèses d'étude

La détermination et l'estimation des effets directs et indirects de la REUT vont s'appuyer sur différentes hypothèses d'étude déterminées par le nouveau cadre législatif et le contexte général de l'activité de REUT. Nous considérerons ainsi, pour la suite de notre travail, que les hypothèses suivantes sont avérées justes.

H₁: Les valeurs seuils définies par l'arrêté de 2010 garantissent la sécurité sanitaire des hommes, des animaux, ainsi que la protection des sols et des ressources naturelles d'eau.

H₂: Les traitements épuratoires adoptés sont considérés comme efficaces et garantissent donc les niveaux de qualités recherchés.

H₃: L'irrigation est pratiquée de telle sorte que l'on considère que l'absence de saturation en eau des parcelles arrosées, provoquant des infiltrations rapides et des ruissellements accidentels hors du site, est garantie.

H₄: Au niveau économique, seront pris en compte uniquement les surcoûts liés au traitement tertiaire, à la mise en place du réseau et à la maintenance de celui-ci. Les coûts situés en amont sont en effet, quel que soit le commanditaire considéré, pris en charge sur le financement de la STEP.

H₅: Les agriculteurs participant à des projets de REUT pratiquent déjà l'irrigation et possèdent donc leur propre matériel d'irrigation.

Il s'agit là d'une situation relativement idéale. Nous nous attacherons au fil de ce chapitre à pointer les risques éventuels de dysfonctionnement ainsi qu'une estimation de leur poids sur le risque global de l'activité.

I.2. Inventaire des effets

On a choisi de distinguer deux types d'effets de la REUT divisés en effets économiques et non-économiques (cf. Tableau 6), ainsi que leur caractère direct et indirect. Les effets économiques correspondent à des coûts financiers liés aux différents aspects (matériel, mise en œuvre) de la REUT. Concernant les effets non-économiques, on a distingué les impacts environnementaux et sociaux. Il est évident que ces impacts seront soit positifs (baisse de pression environnementale), soit négatifs (risques). Nous essaieront par la suite d'interpréter économiquement ces effets.

Effets économiques	Effets non-économiques
Surcoûts liés à l'étude préalable	Impacts environnementaux
Surcoûts liés au système épuratoire Coûts d'investissement Coûts de fonctionnement	Salinisation des sols et des nappes Pollution physico-chimique des milieux récepteurs Evolution de la fertilité du sol Baisse des besoins en fertilisants
Surcoûts liés au système d'irrigation Coûts d'investissement Coûts de fonctionnement Economies liées au prix de l'eau Coût de la maintenance	Impacts sociaux
Economies/Surcoûts liés aux cultures Economies/Surcoûts dû aux intrants Création de contrats privilégiés	Acceptabilité sociale par le grand public Acceptabilité par les professionnels Création d'emploi Tourisme Modification du paysage Baisse de l'emprunte eau des villes

Tableau 6 : Présentation des différents effets économiques et non-économiques, directs et indirects de la REUT en irrigation agricole.

Ces effets varieront selon l'échelle considérée. Les impacts entraînés par le recyclage des EUT seront en effet différents d'un acteur à l'autre : les agriculteurs, les gestionnaires d'espaces verts ou de golfs, les constructeurs de matériels d'épuration ou d'irrigation, et les collectivités. Dans le cadre de notre étude, nous nous attacheront à évaluer les impacts de cette activité du point de vue des agriculteurs (cf. Tableau 7). Des tableaux présentant les effets de la REUT à l'échelle des gestionnaires d'espaces verts et à l'échelle des collectivités sont disponibles en Annexe 12 et en Annexe 13.

	Impacts environnementaux	Impacts agronomiques	Impacts socio-économiques
-	Salinisation du sol	Adaptation SC	Coûts supplémentaires Diminution de la MB ?? (Culture intégrée dans rotation moins rémunératrice)
	Equilibre microbien du sol si engorgement	Drainage ou amélioration de la conduite des apports	Compétence requise Nécessité d'embaucher un employé supplémentaire
		Adaptation technique (SI, SE, réseau de distribution, maintenance, etc.)	
+	Diminution de la pollution du milieu récepteur		Subventions Primes PAC
	Apports nutriments au sol	Diminution des intrants Assurance de l'accès à l'eau Augmentation du rendement ??	Diminution des coûts Création de contrats privilégiés avec IAA/semenciers
	Diminution de la pression sur la ressource en eau conventionnelle	Augmentation/garantie de la qualité et de la quantité de production ??	Suppression coût de l'eau conventionnelle
	Valorisation des déchets		Valorisation de leur image

Tableau 7 : Présentation des impacts positifs et négatifs de la REUT à l'échelle des agriculteurs.

I.3. La méthode ACB : Comment évaluer les différents effets répertoriés ?

I.3.1. Qu'est-ce que l'ACB ?

I.3.1.1. Quelques définitions... (ICRA, 2007)

L'Analyse Coûts/Bénéfices (ACB) est l'une des méthodes les plus couramment utilisées dans l'évaluation de projets. Elle conduit à la comparaison des coûts³ et des bénéfices⁴ engendrés par la réalisation du projet considéré, sur une période de temps déterminée.

³ Les coûts sont « les effets négatifs, voulus ou non-voulus, d'un projet ». Il est à noter que les investissements font également partie des coûts.

⁴ A l'inverse, les bénéfices représentent, quant à eux, « les effets positifs, voulus ou non-voulus, d'un projet ». Ainsi, les coûts et les bénéfices peuvent être voulus et attendus ou non-voulus et inattendus.

Une analyse économique peut être effectuée avant le début du projet (ex-ante) ou après la fin du projet (ex-post). Une appréciation est normalement portée sur la faisabilité économique d'un projet et, par conséquent, la plupart des ACB sont *ex-ante*. Dans notre cas, nous effectuerons une analyse ex-post sur des projets existants en vue de l'appliquer à des analyses ex-ante.

Préalablement à l'ACB, il est essentiel de définir les limites du projet et d'en préciser le ou les objectifs ainsi que l'ensemble des ressources disponibles (ex : travail, capital, savoir, ressources naturelles, etc.).

On distingue deux types d'ACB : l'ACB financière et l'ACB économique.

Une **ACB financière** est effectuée selon la perspective de personnes, groupes ou unités directement impliqués dans le projet. L'analyse financière constitue une simplification de la méthode ACB. En effet, sont uniquement pris en compte les coûts et les bénéfices réalisés au cours du projet (c'est-à-dire externalités⁵ non-comprises).

Une **ACB économique** est réalisée selon la perspective plus large de l'impact sur la société. Cette différence va impliquer, pour le calcul des coûts et des bénéfices, la prise en compte de l'ensemble des coûts et des bénéfices, y compris des externalités, parfois difficiles à convertir en bénéfice comptable. Cette dernière approche implique que l'on définisse une méthode d'évaluation financière des bénéfices non financiers, comme l'impact environnemental.

I.3.1.2. Prise en compte de la valeur économique de l'environnement

L'homme a un rôle pivot dans la prise en considération de l'environnement. Il est en effet le seul évaluateur de la valeur de l'environnement. C'est parce qu'il considère que la dégradation des fonctions et des attributs environnementaux implique pour lui une perte d'une valeur grandissante, que la protection de l'environnement prend aujourd'hui une place croissante. La difficulté principale étant que les individus impactés par une baisse de qualité de l'environnement ne sont pas à l'origine directe de sa dégradation.

L'ACB économique permet une approche de la valeur économique de l'environnement, puisqu'elle vise à définir « **la valeur de l'environnement pour la société** ». Cette approche permet ainsi de valoriser un projet considéré comme non-viable sur le plan économique (résultat de l'analyse financière négatif) mais viable sur le plan environnemental (résultat de l'analyse économique positif). Cette méthode peut donner aux promoteurs du projet des arguments pour convaincre les décideurs au-delà du simple raisonnement économique. Par exemple, le maintien de la fertilité des sols peut ne pas apparaître rentable pour un individu ou un groupe, mais elle peut l'être pour la communauté ou la région. (ICRA, 2007)

Pendant, il est essentiel de garder à l'esprit qu'une ACB économique positive ne garantit pas la rentabilité des projets. Les démarches à suivre ne seront pas, par conséquent, nécessairement motivantes pour les agriculteurs sans prise en compte de concept plus abstraits comme la réduction des emprunts eau ou carbone des activités humaines. L'intervention de la collectivité sera alors essentielle pour compenser économiquement un choix dont la motivation n'est pas financière. Il faudra par exemple la perspective de subventions publiques pour les inciter à investir dans ces pratiques qui bénéficient à toute la société, en préservant l'environnement et pas seulement à l'agriculteur. (ICRA, 2007)

L'Annexe 14 et l'Annexe 15 définissent la Valeur Economique Totale (VET) de l'environnement et présentent les différents aspects qu'elle englobe.

I.3.2. Une méthode qui présente quelques lacunes à combler...

I.3.2.1. Une méthode qui ne présente qu'une image partielle du projet

Beaucoup d'ACB ne prennent en compte que les coûts et les bénéfices voulus. Ces analyses ne couvrent ainsi qu'une partie du projet. Cela relève du fait que les coûts et les bénéfices ne sont pas toujours concrets et ne peuvent pas ainsi être toujours exprimés en termes monétaires, ce qui limite l'utilité d'une ACB.

De manière générale, les bénéfices apparaissent plus difficiles à estimer que les coûts. Ainsi, est-il, par exemple, plus difficiles d'estimer les bénéfices d'un projet de construction d'une ceinture verte que d'en évaluer les coûts d'entretien.

⁵ Le concept d'externalités correspond aux « effets externes, c'est-à-dire, aux coûts et aux bénéfices attribuables au projet mais supportés ou profitant à des parties tierces non-impliquées dans le projet ». Par exemple, dans notre cas, la REUT en irrigation agricole peut avoir comme bénéfice non-voulu d'attirer plus de touristes vers les villes exerçant cette activité à travers la création de ceintures vertes.

I.3.2. Une méthode sujette à la variabilité des coûts d'un projet de REUT

Les différentes variables économiques des projets de REUT ont été identifiées et récoltées préalablement lors du travail réalisé, en collaboration avec le Cemagref d'Aix-en-Provence, par HUARD, QUILY et SORNAY (2010). Cette étude s'est vue complétée par une recherche bibliographique. Les enquêtes semi-directives, réalisées auprès de professionnels de l'épuration et de l'irrigation, ont permis de recueillir des données utilisées pour établir des indicateurs économiques reflétant au mieux la réalité du terrain.

La grande diversité des projets de REUT se traduit par une grande variabilité des coûts financiers. Il en est ainsi, par exemple, pour les coûts engendrés par la construction d'installations supplémentaires (telles que : aménagements pour le traitement tertiaire, bassins de stockage, réseau de distribution de l'eau, etc.). Ces coûts vont être fortement influencés par les contraintes locales : prix du site de construction, distance entre le site de production et de consommation, nécessité de doubler ou d'aménager le réseau. Ces contraintes sont primordiales car dans de nombreux projets l'investissement principal est dû au réseau de distribution à mettre en place. (ECOSSE, 2001)

I.3.2.3. Complexité de la méthode dû aux interdépendances des différents effets répertoriés

La définition des interdépendances entre l'ensemble des effets répertoriés est essentielle, afin d'éviter le double comptage d'un effet par exemple. En effet, certains effets induits par la REUT agiront sur plusieurs échelles en même temps, et ce parfois dans différentes boîtes (économique, environnementale, agronomique et sociale). L'Annexe 16 présente une schématisation de ces relations entre les divers impacts de la REUT.

II. Estimation des effets économiques de la REUT

Cette partie fait principalement état de l'ensemble des coûts d'investissement et des coûts d'exploitation nécessaire à la mise en place et au fonctionnement d'un projet de REUT. La complexité de cette partie repose sur la différenciation entre coût et bénéfice économiques ou financiers, et coûts et bénéfices non-économiques mais traduits en termes économiques.

II.1. Eléments constitutifs du coût total d'un projet de REUT

Le coût total d'un projet de REUT prend en compte :

- ◆ Les coûts d'investissement de la collecte de l'effluent secondaire, du traitement tertiaire, du stockage, du réseau de distribution jusqu'à la parcelle ;
- ◆ Les coûts d'exploitation et de maintenance.

La répartition entre ces coûts varie d'un projet à l'autre et dépend des procédés de traitement mis en œuvre.

II.1.1. Coûts relatifs à l'étude préalable

Il s'agit de l'étude de faisabilité, qui comprend la réalisation des dossiers d'autorisation, et une étude de l'efficacité de l'ensemble de la filière.

L'arrêté préconise la réalisation d'un suivi préalable sur une période d'au moins six mois incluant impérativement la période d'irrigation, avec une fréquence d'analyses mensuelle des entérocoques intestinaux et des E. Coli, des phages ARN F spécifiques, des spores de bactéries anaérobies sulfite-réductrices, de même qu'un suivi des dispositifs techniques. Lors de cette étude de validation du procédé de traitement, la teneur en ETM (éléments traces métalliques) doit être surveillée. Cette mesure est habituellement réalisée à partir des analyses de boues effectuées par les STEP.

Selon les enquêtes réalisées en 2010 par HUARD, QUILY et SORNAY, ce type d'analyses multi-critères coûterait de 800 à 1000€/u. A ce stade du projet, les analyses visent à contrôler de nombreux paramètres, ce qui explique la différence de prix avec celles effectuées en routine (\approx 100€/u à Clermont-Ferrand). Le contrôle multi-critère préalable durant une période de 6 mois, nous amène à un coût compris entre 4800 et 6000 €.

Le suivi de la qualité des sols et des cultures n'est quant à lui pas toujours effectué. Lorsqu'il est réalisé, c'est uniquement au moment de l'étude préalable comme ce fut le cas à Clermont Ferrand par exemple. Le Tableau 8 présente le coût de ces analyses. Le coût d'une analyse de sol complète s'élève à 264 € au minimum par point. Il faut à présent déterminer le nombre d'analyses nécessaires par ha. Le nombre de points d'analyses va dépendre de l'homogénéité de la parcelle. Il est difficile de donner un nombre précis d'analyses par unité de surface. On considérera que pour un sol homogène, une analyse par hectare peut être requise.

Type d'analyse	Prix
Bilan 8 métaux lourds (As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Zn)	49,50 €
HAP	45,00 €
PCB (PolyChloroBiphényles)	59,50 €
Phtalates (dont DEHP)	110,00 €

Tableau 8 : Coût des analyses de sol.
Source : (HUARD, QUILY et SORNAY, 2010)

Par la suite un suivi épisodique de la qualité du sol est conseillé (à la fréquence d'une analyse tous les 3 à 5 ans), surtout si des traces d'ETM sont détectées dans les boues. (HUARD, QUILY et SORNAY, 2010)

II.1.2. Coûts relatifs au système épuratoire

II.1.2.1. L'investissement en traitement tertiaire

Un investissement supplémentaire (extensif ou de désinfection) pour éliminer les pathogènes de l'eau en sortie de STEP va s'avérer fondamental dans une bonne partie des projets. En effet, selon le débouché du projet de REUT considéré, un niveau de qualité spécifique sera demandé, pour satisfaire aux exigences données dans l'arrêté.

Le travail réalisé par HUARD, QUILY et SORNAY (2010) présente un ordre de grandeur des coûts d'investissement des techniques de désinfection. Le coût des unités de traitement peut en effet varier d'un facteur 10 selon la région considérée, les acteurs, les volumes et la qualité des eaux brutes à traiter. Nous nous servons de ces données comme base de travail pour atteindre une eau de qualité A.

Concernant l'évaluation des coûts de traitement par ozonation, chloration, nanofiltration et infiltration-percolation, aucune donnée chiffrée n'a été recueillie.

II.1.2.2. Les frais de fonctionnement : Un coût d'exploitation variable selon les traitements

Selon MONCHALIN G. et AVIRON-VIOLET J. (2002), le coût d'exploitation se réduit fortement lorsqu'on passe d'une station de faible capacité (< 5 000 m³/j) à une station de capacité moyenne (> 20 000 m³/j), ils sont respectivement de l'ordre de 1,26 €/m³ et de 0,69 €/m³ lorsque la filière répond à la norme Title 22. Une augmentation de capacité au-delà de 20 000 m³/j ne permet plus une baisse importante des coûts (cf. Tableau 9).

Procédé	Coûts d'exploitation
Traitement UV	0,02 €/m ³
Ozonation	-
Chloration	0,43 €/m ³ + 4 €/kg de Cl
Microfiltration	[0,5 ; 1,16] €/m ³
Ultrafiltration (UF)	1,13 €/m ³
Nanofiltration (NF)	[0,10 ; 0,21] €/m ³ (hors main-d'œuvre)
Osmose inverse (OI)	[0,45 ; 10] €/m ³
Lagunage	0,07 €/m ³ (Cf. ASA Limagne Noire)

Tableau 9 : Estimation des coûts d'exploitation des procédés de désinfection pour la REUT.
Source : (HUARD, QUILY et SORNAY, 2010).

La comparaison des coûts d'exploitation annuels permet de souligner que le procédé présentant les frais de fonctionnement les plus faibles est le traitement UV suivi par le lagunage. Sur la base des données de l'ASA Limagne Noire, les travaux et l'énergie nécessaire pour maintenir la pression dans le réseau de 60 km de canalisations représentent la part la plus importante des frais de fonctionnement, soit 29%, ce qui va dans le sens de l'étude de BARNETCHE (2007). (cf. Figure 2)

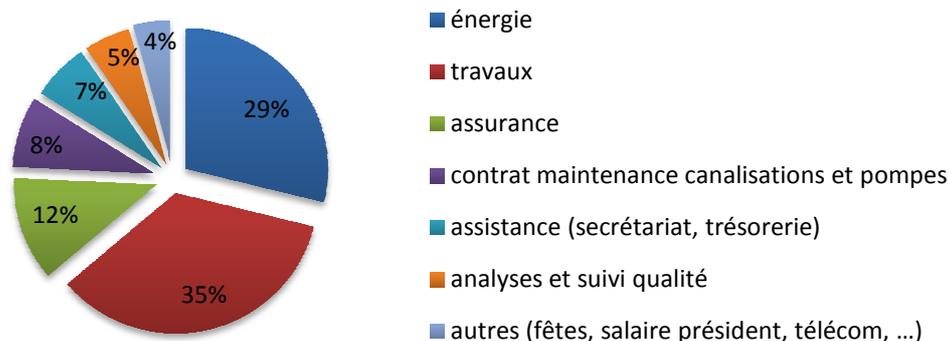


Figure 2 : Frais de fonctionnement de l'ASA Limagne Noire.

Source : (HUARD, QUILY et SORNAY, 2010).

II.1.2.3. Contrôle de la qualité des eaux en sortie de traitement : Mesure de l'efficacité de traitement

Lors de l'exploitation en routine, les analyses nécessaires au management de la qualité (ETM, HAP, etc.) sont effectuées lors des analyses de conformité des boues. Des bilans sur les MES et DCO sont réalisés régulièrement par les STEP, leur fréquence dépendant de la taille de l'installation. Si l'eau en sortie de STEP est conforme à ces paramètres, il ne reste plus qu'à analyser E. coli pour les eaux de qualité C ou D par exemple. Pour les eaux de meilleure qualité il faudra nécessairement envisager un surcoût d'analyse des MES et DCO.

Ce type d'analyses multi-critères coûterait de 800 à 1 000 €/u. Les données transmises par le syndicat des eaux du Mont Saint Michel, font état d'un coût de 5 000 €/an, tandis que l'ASA de Limagne Noire dépense 3 000 €/an pour ces analyses. (HUARD, QUILY et SORNAY, 2010)

II.1.3. Coûts relatifs au système d'irrigation

II.1.3.1. Coûts des infrastructures d'irrigation

GLEYES, LOUBIER et TERREAUX (2001) définissent les coûts des infrastructures d'irrigation selon la formule suivante :

$$\text{Coûts des infrastructures d'irrigation} = \text{Coûts d'investissement} + \text{Coûts de maintenance} + \text{Coûts d'exploitation}$$

Ils présentent les coûts d'investissement en système d'irrigation (SI) comme rares mais onéreux. Pour notre étude, nous excluons les coûts d'investissement relatifs aux SI, les agriculteurs pratiquant la REUT étant supposés préalablement équipés. Les coûts de maintenance sont caractérisés, quant à eux, par leur croissance régulière sur la durée de vie des équipements. Enfin les coûts d'exploitation sont, de manière générale, relativement stables.

Un second type de variabilité est à prendre en compte. En effet, alors que certains coûts sont fixes, d'autres vont dépendre des volumes consommés (ex : électricité, etc.).

II.1.3.2. Durée de vie des équipements d'irrigation et maintenance

La norme NF 60010 définit la maintenance comme l'ensemble des activités destiné à maintenir ou rétablir un bien dans un état ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement, pour accomplir une fonction requise (TIERCELIN, 1998). On distingue trois types d'actions de maintenance :

- ◆ La maintenance corrective est la « maintenance effectuée après défaillance ».
- ◆ La maintenance préventive est effectuée « selon des critères prédéterminés, dans l'intention de réduire la probabilité de défaillance d'un bien ou la dégradation d'un service rendu ».
- ◆ Le renouvellement intervient lorsque les dépenses de maintenance corrective et préventive sont ou risquent d'être trop importantes.

II.1.3.2.1. Estimation de la valeur actuelle des équipements

L'estimation de la valeur actuelle des équipements a pour but de comparer le coût d'ouvrages existants depuis plusieurs années et réalisés à des dates différentes.

Si on ne dispose pas des plans d'investissement passés, il est alors nécessaire d'établir un devis de reconstruction du réseau à l'identique à partir des caractéristiques techniques de celui-ci. Dans le cas contraire, il s'agit d'actualiser les coûts d'investissement en utilisant des indices nationaux de variation des prix. L'amortissement technique des matériels est à prendre en compte.

II.1.3.2.2. Durées de vie

Les ouvrages hydrauliques agricoles sont composés d'équipements à durées de vie très variables et parfois très élevées. Ces durées de vie vont conditionner la détermination du coût des projets de REUT. Il est donc essentiel d'être rigoureux dans la comparaison des réseaux d'irrigation. Il est ainsi nécessaire de retenir les mêmes hypothèses pour tous les équipements identiques. Il sera donc important de comparer les conditions de maintenance, le contexte, etc.

II.1.3.3. Coût du réseau d'adduction

Les eaux usées traitées devront être ensuite acheminées jusqu'à la parcelle en passant par un réseau de distribution. Ce réseau devra être dimensionné en fonction du débit et de la pression souhaités, de la longueur de canalisation et de la topographie.

Selon le niveau de qualité des EUT, les bactéries présentes dans l'eau peuvent s'accrocher aux parois des canalisations et ainsi former un biofilm. Ce développement sera notamment fonction de la vitesse de circulation, du taux de matières organiques et de la température. La formation du biofilm présente deux risques : un risque de bouchage des canalisations, qui demanderait alors une maintenance accrue, et un risque de détachement du biofilm et de colmatage des organes de distribution ou de régulation.

Dans le cas de la REUT, le réseau d'adduction doit être soigneusement identifié et cartographié, en particulier s'il passe à proximité d'un réseau AEP. Il doit également être utilisé au maximum hors périodes de fréquentation (ex : irrigation de nuit dans les espaces publics), ce qui induit un nécessaire surdimensionnement (BAUMONT, 2004). Lorsque le réseau s'étend sur une grande distance (plusieurs dizaines de kilomètre) et donc que le temps de séjour de l'EUT dans les canalisations est élevé, il est essentiel de prévoir des analyses aux prises d'eau pour s'assurer d'une non-dégradation de la qualité des EUT. A titre d'exemple, Clermont-Ferrand qui possède un réseau de 60km effectue plusieurs contrôles chaque année. Ce n'est pas le cas sur le réseau du Mont-Saint-Michel qui ne s'étend que sur 5 km.

Le coût du réseau de distribution reste un élément important, il peut atteindre 70 % du coût total en fonction des conditions spécifiques du site. La construction de nouveaux réseaux est moins chère que l'aménagement de réseaux existants. On rapporte des valeurs allant de 0,05 €/m³ environ en Arabie Saoudite, à 0,11 et 0,28 €/m³ approximativement dans la région de Dan et à Jérusalem en Israël. (ECOSSE, 2001)

BARNETCHE (2007) évoque quelques investissements supplémentaires : la mise en place d'un réseau de canalisation parallèle, un stockage des EUT (préférentiellement dans des réservoirs enterrés ou couverts dont l'entretien est moins contraignant que celui d'un lac), une éventuelle filtration combinée à une aération (en particuliers si le stockage est réalisé à l'air libre).

Equipement		Prix proposés par le cabinet Merlin (en 2009)
Tranchée main	Terrain normal	40 €/ml
	Présence d'eau	20 €/ml
Remblai		20 €/ml
Traversée de rivière		10 000 € (prix unitaire si > 5 m)
Passage sous route départementale		10 000 €
Passage sous voie ferrée		25 000 €
PVC irrigation 16 bars (140-400 mm)		22 - 68 €/ml

Tableau 10 : Coûts liés au réseau d'adduction selon les prix pratiqués par le cabinet Merlin.

Source : (HUARD, QUILY, SORNAY, 2010).

Le coût de l'adduction va donc varier considérablement d'un projet à l'autre en fonction de :

- ◆ La longueur des canalisations utilisées pour placer des bornes sur toutes les parcelles à irriguer ;
- ◆ La topographie qui sera déterminante dans le besoin de refoulement et ainsi la capacité des pompes.
- ◆ La pose de canalisations coûte actuellement en moyenne de 40 à 80 €/m linéaire pour des diamètres variant de 140 à 400 mm.

Concernant les coûts d'une station de pompage, il n'existe que peu de données. On note par ailleurs une grande variabilité de ces coûts influencés notamment par le contexte géographique et les volumes d'eau à transférer.

II.1.3.4. Coûts de stockage

Quel que soit le volume d'eau disponible en sortie de STEP, la période d'irrigation n'étant pas continue, il sera nécessaire de stocker les eaux usées traitées, ce qui est susceptible de présenter un risque d'évolution de la qualité des eaux (BAUMONT, 2004). Toutefois, un stockage de courte durée (de 1 à 3 jours) ne fera pas varier la qualité de l'eau.

Un stockage d'une durée de trois à quinze jours permettrait, quant à lui, une amélioration de la qualité bactériologique de l'eau grâce à une exposition aux UV, dans la mesure où le bassin est de faible profondeur.

Enfin, un stockage intersaisonnier, d'une durée de quelques mois (du début du printemps au début de l'été par exemple) nécessite une surveillance de la qualité bactériologique des EUT. Ce type de stockage fonctionne de la même manière que le lagunage. La profondeur du bassin, comprise entre 5 et 15 m, permet la formation de deux zones : une zone anaérobie de dénitrification située en profondeur et une zone aérobie de nitrification située en surface correspondant à une zone d'élimination des nitrates. Les phosphates, quant à eux, sont éliminés par décantation. La nécessité de surveiller les EUT stockées naît du risque de développement d'algues qui pourraient colmater les systèmes d'irrigation. On préconisera d'alimenter ce genre de bassin de façon discontinue pour limiter les risques.

Le stockage est peu répandu en France, ce qui limite le recueil de données relatives aux coûts engendrés. Ils sont, par ailleurs, difficilement généralisables.

II.1.3.5. Coûts d'installation de chantier et coûts annexes

Selon HUARD, QUILY et SORNAY (2010), les coûts d'installation de chantier et coûts annexes peuvent s'élever jusqu'à 200 000 €.

II.1.3.6. Les frais de fonctionnement

GLEYES, LOUBIER et TERREAUX (2001) définissent les coûts d'exploitation des systèmes d'irrigation comme la somme des coûts de gestion courante, d'énergie, de personnel, les impôts et taxes redevables aux Agences de l'eau, ainsi que les prestations de services entre divers gestionnaires (convention de restitution établie entre le gestionnaire d'une STEP et l'usager gestionnaire du SI).

Les coûts en énergie sont proportionnels aux volumes pompés et à la longueur des canalisations. Les coûts en personnel correspondent à la différence entre la masse salariale et le coût lié au personnel affecté à la maintenance. (GLEYES, LOUBIER et TERREAUX, 2001) Ces coûts sont facilement identifiables à travers notamment les différentes factures recensables.

Ainsi le coût moyen d'exploitation (CE) sera égal au produit du taux d'actualisation (a) par la somme actualisée des dépenses futures d'exploitation ($\sum \frac{E_t}{(1+a)^t}$). Il sera donc calculé à partir de la formule suivante :

$$CE = a \sum_{t=1}^{+\infty} \frac{E_t}{(1+a)^t}$$

II.2. Evaluation des bénéfices économiques de la REUT

II.2.1. Gain sur les coûts en intrants

AGHAI et CHOUKR-ALLAH (2005) ont effectué un travail visant à estimer l'impact de l'irrigation par les eaux usées épurées sur la croissance et la production d'une culture de tomate conduite en plein champ, ainsi que sur les caractéristiques chimiques du sol et sur le bilan azoté. Les essais ont été menés à la station d'épuration des eaux usées de Drarga. Cette étude soutient qu'il est possible d'obtenir, grâce à l'activité de REUT, un gain sur le coût des intrants pouvant s'élever de 110 à 130 €/ha environ selon la qualité de l'eau.

L'absence d'engrais conduirait en effet à terme à une diminution de la fertilité du sol. Comme les apports des EUT en éléments fertilisants sont faibles et ne parviennent pas à couvrir l'ensemble des besoins de la culture, celle-ci va alors puiser dans les réserves du sol. On enregistre ainsi une diminution des teneurs du sol en azote (de 13 à 26%), en phosphore (50%) et en potassium (50%). (AGHAI et CHOUKR-ALLAH, 2005)

II.2.2. Gain de productivité

La REUT permet de valoriser les éléments nutritifs véhiculés par l'eau en les apportant à la parcelle selon un mode équivalent à la fertigation. Ainsi sur la commune de Drarga au Maroc, une lame d'eau épurées de 100 mm (1 000 m³/ha) apporterait aux cultures 40 kg de N minéral/ha, 11 kg de P assimilable/ha et 28 kg de K/ha selon SOUDI (2000). En Espagne, l'expérimentation du golf de Mas Nou a fait apparaître une économie d'engrais couvrant environ 7% des coûts de fonctionnement (BARNETCHE, 2007). Cette information doit cependant être mise en relation avec le fait que les exigences de rejet sont de plus en plus serrées, notamment dans les zones sensibles. Cela implique un apport de plus en plus faible d'azote et de phosphore. Ce dernier constitue par ailleurs un des principaux facteurs de développement des algues. Il est donc nécessaire de limiter sa concentration dans les eaux recyclées, notamment si elles doivent être stockées à l'air libre, afin d'éviter les risques de colmatage des systèmes d'irrigation. Ainsi, BARNETCHE montre dans son rapport de 2007 que seulement 35% des golfs américains utilisant des eaux usées ont réalisé une économie d'engrais. On peut

ajouter que les effluents traités apportant aussi de la matière organique, le fonctionnement des sols s'en trouve amélioré ce qui peut expliquer une part de l'augmentation de l'efficacité agronomique.

Le gain en intrants serait accompagné d'un gain significatif en rendement de cultures (en blé tendre, maïs grain et fourrager, courgette, courge, tomate et pomme de terre par rapport à des cultures non-irriguées), en particulier là où les rendements étaient faibles avant. Notons cependant l'exemple du golf de Sainte Maxime qui a presque doublé les fréquences de tontes lors du passage aux effluents traités malgré une baisse des apports d'engrais de plus de 25%. (HUARD, QUILY, SORNAY, 2010)

Il serait donc intéressant de se pencher sur les bénéfices que peut avoir la REUT sur les exploitations françaises en chiffrant en France les éventuelles augmentations de rendement ou en évaluant le bénéfice de la sécurisation des rendements. Le problème essentiel demeure que l'équilibre minéral des EUT ne correspond pas aux besoins effectifs des cultures, ni en dosage, ni en timing. En conséquence, la nécessité d'une correction persiste, imposant une surveillance avant correction.

II.2.3. Les subventions

Les projets de REUT bénéficient souvent d'incitations tarifaires ou de subventions publiques. A Hawaï par exemple dans le comté de Maui, BARNETCHE (2007) a observé que les tarifs de l'eau recyclé sont différenciés selon les usages et sont plus intéressants pour les golfs et l'agriculture (0,03 €/m³) que pour les autres usagers (0,10 €/m³).

En Tunisie, l'Etat prend en charge la mobilisation et la distribution des EUT, l'agriculteur paye son eau à 0,013 €/m³ sur tout le territoire (LAHACHE GAFREJ, 2005). Cette politique a pour but d'encourager les agriculteurs à recourir d'avantage à l'utilisation d'EUT. En France, le soutien incitatif à une politique d'économie de l'eau par la REUT reposerait principalement sur les financements des Agences de l'eau, des Conseils Généraux et Régionaux, des programmes d'aide européens, en plus de la volonté des collectivités territoriales. La part de subventions de ces acteurs est variable selon les projets (cf. Annexe 17 pour les communes du Mesnil-en-Vallée et de Clermont-Ferrand). Les projets doivent cependant apporter une amélioration de la qualité du milieu aquatique (dans le cadre de la DCE) pour être soutenus.

II.2.4. Economie du prélèvement de l'eau brute de surface

Les expériences menées par AGHAI et CHOUKR-ALLAH (2005) au Maroc montrent qu'il est possible d'économiser 28,66% environ sur le coût de l'irrigation si on utilise de l'EUT plutôt que de l'eau conventionnelle issue de pompage.

Selon BARNETCHE (2007), le prix de revient de l'EUT pour les golfs de Royan, de Pornic et de Saintes est respectivement d'environ 0,10 ; 0,15 et 0,27 €/m³. Pour MONCHALIN et AVIRON-VIOLET (2002), le prix de revient de l'eau traitée pour la réutilisation à des fins agricoles et urbaines varie dans la fourchette de 0,06 €/m³ (moins de 15% du prix de l'EUT sans réutilisation) à 0,44 €/m³ (moins de 55% du prix de l'eau traitée sans réutilisation). Enfin selon BERAUD, le coût de revient de l'eau du projet de Settat au Maroc est d'environ 0,088 €/m³.

Par comparaison, l'eau issue de forages coûte de 0,02 à 0,05 €/m³, l'eau brute de surface est facturée de 0,15 à 0,35 €/m³. Le prix de l'eau recyclée à usages agricoles reste donc supérieur à celui de l'eau de surface ou de forage. Cependant elle présente d'autres intérêts et peut parfois être la seule ressource disponible.

Le prix de l'eau conventionnelle d'irrigation, en France, peut aussi bien prendre des valeurs situées en-dessous de 0,01€/m³, comme il peut atteindre des valeurs supérieures à 2,00€/m³. Cette variation va dépendre de différents facteurs. Le principal correspond au coût d'adduction de l'eau. La multiplicité des usages de cette eau et des infrastructures permettant de l'obtenir va ensuite être à l'origine d'une variation conséquente de son prix. C'est le cas pour l'ASA Limagne Noire, dont les bassins de lagunage, permettant d'atteindre la qualité requise des EUT, correspondent aux bassins des eaux de la sucrerie Bourdon à Clermont-Ferrand. Les coûts d'investissement s'en retrouvent particulièrement diminués.

Conclusion

Certains aspects financiers restent pour l'instant peu documentés, ce qui oblige à conduire une étude de faisabilité des projets au cas par cas.

D'après ECOSSE (2001), dans les pays où les réserves actuelles en eau douce sont, ou seront prochainement, à la limite du niveau de survie, le recyclage des EUT semble être la technique alternative la plus abordable, tant au niveau financier (les traitements extensifs sont les plus adaptés) qu'au niveau technique pour les réutilisations agricoles, industrielles et urbaines ne nécessitant pas une eau de qualité potable.

III. Evaluation des effets non-économiques directs et indirects de la REUT en irrigation agricole

Précédemment, nous avons présenté la division des effets non-économiques en effets environnementaux ou agro-écologiques et sociaux. Dans cette partie nous essayons de les qualifier, d'émettre des hypothèses quant à leur évolution, et de soumettre certaines solutions à des effets potentiellement négatifs.

III.1. Impacts environnementaux

Bon nombre des impacts environnementaux recensés ici sont à moduler selon les caractéristiques biophysiques et les pratiques agricoles appliquées. Ainsi l'ampleur des impacts sera modifiée selon la quantité d'eau apportée, les dates d'apport, et la manière dont l'agriculteur utilise cette ressource. En effet, les effets différeront si :

- ◆ L'agriculteur utilise les EUT comme ressource de substitution à l'eau conventionnelle et aux intrants. On aura alors une diminution de la pression sur la ressource « eau » et la ressource « sol ».
- ◆ L'agriculteur utilise les EUT en complément des de l'eau conventionnelle et des intrants. On aura alors un risque plus important de modification des caractéristiques des sols et des eaux.

III.1.1. Le risque de salinisation des sols

La salinisation d'un sol est définie, par Claire KÖNIG (2006), comme « son enrichissement en sels solubles (chlorures, carbonates, sulfates de sodium, de magnésium et de calcium) ». Le sol est considéré comme salé si la concentration dans la solution dépasse 1 à 2 % dans les 20 cm supérieurs. Lorsque la texture du sol favorise la capillarité, et si la nappe aquifère est peu profonde, des sels, des bases et des composés sodiques se déposent facilement dans la tranche des racines. Nous nous intéresserons ici à la salinisation secondaire des sols provoquée par l'activité humaine (soit ici la REUT).

Nous l'avons vu, au fur et à mesure des années, les superficies irriguées se sont étendues. Cependant, le développement de l'irrigation s'est constamment heurté à des menaces relatives à sa durabilité. Ainsi, admet-on généralement que plus de 50% des systèmes de culture irrigués sont affectés à des degrés divers par la salinité. Ainsi, 20 à 30 millions d'hectares seraient sévèrement affectés, contre 60 à 80 millions d'hectares à un degré moindre, ce qui correspond à un pourcentage de la superficie irriguée allant de 10 à 48%. La salinité est un problème majeur dans la plupart des grands systèmes d'irrigation (Inde, Pakistan, Chine, Maghreb, etc.). (MARLET, 2004)

Des études concernant l'irrigation à partir des EUT montrent une accentuation de ce phénomène. En effet la teneur élevée des EUT en sels conduit à une augmentation de la conductivité électrique du sol de 2 à 3 dS/m par rapport aux eaux conventionnelles. (AGHAI et CHOUKR-ALLAH, 2005)

L'augmentation de la salinité du sol peut plus ou moins affecter le rendement de la culture considérée. Ainsi, les expérimentations de VAN HOORN (2001) sur la tomate (dont la variété est jugée comme sensible à la salinisation) ont démontré une diminution de rendement de 25% lorsque la conductivité électrique du sol atteignait les 5 dS/m suite à l'irrigation des parcelles à partir d'EUT.

La salinisation des sols va dépendre en grande partie du contexte climatique et ainsi du bilan hydrique du site étudié. De manière générale, le climat tempéré caractéristique des pays tels que la France ne nécessite pas de lessivage important des sols. En effet, les pluies d'hiver, généralement supérieure à 600 mm/an, vont naturellement lessiver les sols. On peut donc supposer que la REUT n'aura, en France, que peu d'impact sur la salinité des sols.

L'excès de sel stérilise progressivement les terres, le coût global de la salinité provoquée par l'irrigation est estimé à environ 9 milliards €/an. Pour enrayer la perte de terres cultivables due à l'accumulation de sels, l'utilisation de méthodes appropriées de gestion des terres est indispensable. Savoir discerner les symptômes des sols salins à l'avance peut éviter à la fois de coûteux efforts de remise en valeur et des pertes de terres supplémentaires.

La gestion des sols salinisés exige une combinaison des pratiques agronomiques et des considérations socio-économiques. La stratégie principale de maîtrise de la salinité due à l'irrigation consiste à mettre en place de bonnes pratiques culturales, un usage efficace de l'eau et des équipements de drainage. (BRADY, 2002) La solution première est de conserver dans le pilotage de l'irrigation une part de fraction de lessivage dont l'objectif est d'éloigner les racines des zones d'accumulation des sels.

Des propositions de gestion des sols et de l'eau, en vue de réduire ou d'éviter la salinisation des ressources, sont proposées en Annexe 18 et Annexe 19.

III.1.2. Modifications de la pollution physico-chimique des milieux récepteurs

Les différentes études réalisées semblent montrer que l'irrigation de parcelles agricoles par les EUT présente un risque sanitaire comparable à celui rencontré lors d'épandages de boues de STEP. (BAUMONT, 2004)

Les ETM, les HAP et les PCB ont des concentrations, dans les EUT, variables mais généralement faibles. Ainsi, les risques sanitaires à court et moyen termes sont estimés faibles. D'autres composés tels que le (2-éthylhexyl)phtalate (DEHP) et les molécules médicamenteuses sont suspectés d'avoir un impact sur les sols sujets à la REUT (ex : carbamazépine). Des points de vue sanitaire et environnemental, une possible accumulation de ces contaminants persistants dans les sols serait possible après une irrigation prolongée (plus de 10 ans) (AFSSA, 2008). Les études sur le sujet sont encore peu nombreuses.

Nous supposons ici, que la prise en compte de ces modifications de la pollution physico-chimique des milieux récepteurs dans les projets de REUT va induire notamment des coûts d'analyse, de surveillance des sols et des eaux.

III.1.3. Evolution de la fertilité du sol et gestion de la fertilisation

III.1.3.1. Définition de la fertilité du sol

Un sol est dit fertile lorsque celui-ci est capable de donner d'abondantes récoltes. (LAROUSSE, 2001) D'après BARBIER (1955), la fertilité des sols se mesurerait aux rendements qu'ils produisent effectivement. Elle dépendrait de la qualité propre des sols, mais également des pratiques culturales appliquées. On distingue trois types de fertilité : une fertilité physique, une chimique et une biologique.

L'amélioration de la fertilité du sol nécessite la mobilisation par les agriculteurs de pratiques culturales diverses. Une des pratiques de la gestion de la fertilité renvoie à la notion de gestion de la fertilisation des cultures. ANGE (1997) définit ce dernier concept comme « l'ensemble des techniques qui permettent d'augmenter le flux d'éléments fertilisants apportés à ces cultures et d'accroître les prélèvements de ces éléments fertilisants par les cultures ».

La fertilisation est indispensable pour améliorer les rendements. Elle doit être correctement évaluée pour se situer à l'optimum économique. Il existe en effet, si l'on observe l'évolution du rendement en fonction de la dose d'élément fertilisant apportée, un seuil technique au-delà duquel le rendement diminue par effet de toxicité (surdose) et un seuil économique, inférieur au précédent, au-delà duquel le gain supplémentaire ne couvre plus le coût additionnel. Ce seuil est délicat à évaluer car le rendement dépend d'autres facteurs moins bien maîtrisés, notamment en culture de plein champ, comme la pluviométrie, mais aussi la teneur en matière organique ou la structure du sol. (N'DIENOR, 2006)

III.1.3.2. Impacts de la REUT sur la gestion de fertilisation du sol

Les EUT présentent des teneurs en éléments nutritifs dont il sera nécessaire de tenir compte dans le plan de fertilisation des cultures irriguées considérées. Le Tableau 11 montre la quantité de substances nutritives qu'une lame d'EUT de 100 mm peut apporter à l'hectare (BAUMONT, 2004).

N	16 à 62 kg/ha
K	2 à 69 kg/ha
P	4 à 24 kg/ha
Ca	18 à 208 kg/ha
Mg	9 à 100 kg/ha
Na	27 à 182 kg/ha

Tableau 11 : Quantité de substances nutritives apportée à l'hectare.

Source : (BAUMONT, 2004).

Le Tableau 11 permet d'apprécier les quantités non-négligeables en éléments nutritifs que les EUT peuvent apporter. Ne pas les intégrer dans les apports en engrais pourrait donc avoir des conséquences sur la fertilité du sol. Pour plus de précision quant aux possibilités de gestion de la fertilisation, veuillez vous référer à l'Annexe 20 pour la fertilisation azotée, l'Annexe 21 pour la fertilisation potassique, l'Annexe 22 pour la fertilisation phosphatée, et l'Annexe 23 pour le magnésium.

III.1.4. Contamination bactériologique du sol et des eaux souterraines

Plusieurs facteurs vont jouer sur le degré de contamination du sol et donc sur la durée de survie des micro-organismes sur ce sol. Cela va en effet dépendre :

- ◆ Du niveau de qualité de l'EUT réutilisée ;
- ◆ Du type de culture pratiqué ;

- ◆ Du degré d'humidité du sol (directement lié à la fréquence et la quantité d'irrigations) ;
- ◆ Du rayonnement solaire ;
- ◆ Du mode d'apport, l'aspersion ayant un important effet destructeur sur les bactéries ;
- ◆ Eventuellement de son degré de saturation.

Cependant, on observe que la REUT n'entraîne qu'une très faible contamination du sol. Les teneurs en germes pathogènes sont très semblables à celles des échantillons prélevés sur des parcelles irriguées à partir des eaux conventionnelles. Des études réalisées par le PNUD la FAO et l'OMS associés (1998) ont également montrées que la contamination bactérienne ne dépasse jamais la profondeur des premiers 25 cm, ce qui écarte tout risque de contamination de la nappe aquifère par la REUT.

Les différentes études réalisées semblent montrer que l'irrigation de parcelles agricoles par les EUT présente un risque sanitaire comparable à celui rencontré lors d'épandages de boues de STEP. (BAUMONT, 2004)

III.2. Impacts sociaux

III.2.1. Représentation et acceptabilité sociale de la REUT en agriculture par le grand public et les professionnels

III.2.1.1. La REUT, une activité qui véhicule une image différente suivant le référentiel considéré

La REUT reste une activité relativement méconnue en France. La communication à ce sujet est très peu développée, ce qui conduit à des méprises de la part de la population. En effet, de nombreux français (en particulier chez les agriculteurs) tendent à associer la REUT à l'épandage de boues d'épuration, ce qui induit à une peur des risques sanitaires et autres nuisance (odeurs nauséabondes) que cela pourrait causer.

La REUT ne bénéficie que de peu de communication auprès des agriculteurs (premiers concernés), ce qui a pour conséquence un manque de connaissances de leur part en la matière. La REUT leur apparaît avant tout comme une alternative leur permettant de sécuriser leurs cultures, tout en valorisant leur activité et leur image (à travers la valorisation des déchets). Cependant, les agriculteurs sont encore réticents à cette technique. Ils craignent en effet que certaines mauvaises expériences des « boues d'épuration » se répètent. Ils restent également prudents du fait qu'ils ignorent les contraintes, les investissements et les surcoûts qu'ils pourraient avoir à supporter.

Concernant les constructeurs de système d'irrigation et d'épuration, impliqués au premier chef dans la REUT, cette activité constitue une véritable opportunité. Elle permet en effet la création d'un nouveau marché prometteur, principalement en termes d'image mais également en termes financiers.

Enfin pour les collectivités, la REUT va présenter un double intérêt. Premièrement, la REUT peut permettre de dynamiser l'agriculture et l'ensemble des activités locales. Ensuite, réutiliser des eaux non-conventionnelles en les détournant des milieux récepteurs où elles se jettent habituellement, est favorable à l'environnement. La REUT profiterait donc à la commune, à l'agriculture et à l'environnement.

III.2.1.2. Acceptabilité du risque par le grand public et les professionnels

L'analyse de l'acceptabilité des boues d'épuration réalisée par BORRAZ en 2000 nous fournit quelques pistes de réflexion.

Pour comprendre ces problèmes d'acceptabilité, il faut principalement se rappeler de deux événements qui ont contribué à rendre le public prudent. La crise de la vache folle (en 1996), a cristallisé l'idée d'un risque sanitaire lié à l'introduction dans la chaîne alimentaire d'éléments exogènes (donc potentiellement dangereux). De là est née en France une sensibilité à la question de la sécurité alimentaire. Dès les années 1997-1998, un parallèle est établi entre les boues d'épuration et les farines animales. Bien que ces boues provenaient du réseau urbain, un amalgame a été fait avec les boues d'équarrissage. La controverse autour des OGM (dès la fin des années 1997) a contribué également à entretenir la confusion entre risque sanitaire et risque environnemental. Ces différentes polémiques ont éveillé ou aiguisé encore plus les soupçons des différents acteurs de la filière agro-alimentaire. On retrouve au premier rang les distributeurs, qui échaudés par la crise de la vache folle et ses conséquences économiques, prennent prudemment des mesures restrictives ou d'interdiction (de même pour les OGM). (BORRAZ, 2000)

La même étude souligne un élément essentiel dans l'acceptabilité de telles activités dans les mentalités. C'est la multiplication des prises de position contre l'épandage qui alimente l'idée que les boues posent un problème et que les connaissances sont lacunaires. La plupart de ces prises de position ne s'appuie sur aucune donnée fiable relative aux risques. Il n'est jamais fait mention des travaux de recherche réalisés, ni des travaux et négociations engagées depuis février 1998.

Enfin, dans le contexte actuel de sensibilité aux risques sanitaires, les messages délivrés par des experts ou autorités publiques sont régulièrement mis en doute. Or, il existe un risque politique pour les élus locaux ou les services de l'Etat qui s'engagent dans la voie de l'épandage agricole (de boues ou d'EUT), de voir leur responsabilité mise en cause, pour avoir imprudemment encouragé une pratique considérée comme dangereuse. (BORRAZ, 2000)

De même, tout acteur de la filière agro-alimentaire se retrouve confronté à un risque économique. Ils s'exposent à un risque de refus de leurs produits. Une telle crise et ses conséquences interdisent l'épandage d'EUT sur les légumes qu'ils achètent en France. Il semble ne pas y avoir beaucoup de contrôles pour ceux qui viennent d'ailleurs.

Dans la Partie III, nous essaierons d'établir un indicateur permettant d'évaluer cet impact à l'échelle de l'exploitation agricole.

III.2.1.3. Importance de la communication et de la formation

Les EUT sont sous-utilisées ou peu considérées en tant que ressource, en particulier sur le pourtour méditerranéen, zone de pénurie chronique où seuls 3.5% des volumes d'eaux traitées sont réutilisés (BIXIO et WINTGENS, 2006). Les raisons principales à ce manque de considération sont les suivantes (FAO, 2003) :

- ◆ Manque d'informations sur les avantages de la REUT ;
- ◆ Craintes des risques sanitaires supposés (assimilation avec les boues d'épuration) ;
- ◆ Absence de méthodes d'analyse économique des projets de REUT ;
- ◆ Expériences passées de réutilisation d'eaux usées brutes, en conditions non-contrôlées ;
- ◆ Aspect financier (investissements et surcoûts induits) ;
- ◆ Aspects culturels (religion, croyances, etc.).

L'acceptabilité de la REUT en France est pour le moment difficile à analyser, du fait que cette activité est complètement nouvelle. Afin d'assurer son implantation et son développement, ainsi qu'une utilisation sûre et rentable des EUT, la FAO (2003) précise l'importance de communiquer sur le sujet, d'éduquer la population et les différents acteurs de la REUT. (cf. Tableau 12)

Mesures	Objectifs
Campagne d'information du public	Déclencher une conscience collective Présenter la REUT comme une technique de substitution fiable Réduire au maximum la partialité culturelle et psychologique liée à l'a REUT
	Présenter les avantages de la REUT ainsi que les risques sanitaires et environnementaux (transparence de l'activité)
Formation pour les utilisateurs/agriculteurs	Mettre au courant les utilisateurs potentiels des faits liés à la REUT

Tableau 12 : Mesures à prendre pour augmenter l'acceptabilité de la REUT par le public.

Source : Elaboré à partir des données du document (FAO, 2003).

Précisons cependant que très souvent la REUT se fait sans en avoir conscience, qu'il s'agisse des pompages dans les nappes ou les cours d'eau fortement pollués par les rejets urbains, ou dans les pays en voie de développement, d'utilisations délibérées sans le moindre affichage. Les populations consomment des légumes produits avec ces eaux sans précautions particulières, y compris certains d'entre eux labellisés.

III.2.1.4. Impact sur l'image du travail des agriculteurs

Tout agriculteur entreprenant une activité, telles que l'épandage de boues d'épuration ou d'EUT sur ses champs, encourt un risque social. Ainsi, dans un contexte où les agriculteurs sont régulièrement mis en cause pour leurs pratiques et sont sous étroite surveillance dans la gestion des sols et de l'eau, la REUT pourraient voir leur image associée à l'utilisation d'un déchet, pour des motifs financiers. (BORRAZ, 2000)

A l'inverse, cette activité peut être l'occasion de redorer leur blason par la présentation du détail des investissements financiers et humains que cela implique, tout en valorisant les impacts environnementaux et économiques induits. Leur engagement dans cette filière démontre également leur implication pour la collectivité ainsi que dans le développement durable.

III.2.2. La création d'emploi

Les différentes opérations de maintenance afin de minimiser l'impact de la REUT sur le matériel d'irrigation, va demander des contrôles réguliers de ceux-ci. Par exemple, en irrigation localisée, le nettoyage manuel des micro-asperseurs jugés colmatés, peut s'avérer important pour maintenir les performances hydrauliques de ces distributeurs (XANTHOULIS, 2002).

Pour certains projets de REUT, la signature d'une convention peut obliger l'agriculteur à irriguer en périodes d'hivernage par exemple. Cela conduit donc à une augmentation de la quantité de travail et de la maintenance, et ainsi à l'embauche potentielle d'un ouvrier agricole.

Les projets de REUT peuvent également contribuer à l'emploi ponctuel *via* les chantiers à effectuer pour la construction ou l'aménagement des différentes installations (installations pour les traitements épuratoires tertiaires, réseau d'adduction, bassin de stockage et installations d'irrigation).

L'image de la REUT nécessite la mise en place d'actions de communication, en vue d'améliorer l'acceptabilité de cette activité, peut être source de création d'emploi.

Enfin le développement de la REUT pourrait conduire à la naissance d'un nouveau marché agricole, notamment par l'élaboration de matériels adaptés à cette activité, dans certaines entreprises des domaines de l'épuration, de l'irrigation, et du développement durable.

III.2.3. Développement du tourisme

La REUT, pour exister, nécessite la proximité directe des parcelles agricoles et des aménagements épuratoires permettant d'obtenir une eau de qualité réglementaire. Pour ce faire, les projets de REUT s'installent principalement aux alentours de STEP existantes. Etant donné les restrictions définies par l'arrêté de l'ANSES (2010), il s'agit principalement de STEP réceptionnant les eaux usées urbaines et donc situées à la périphérie des villes. Ceci pourrait donc conduire à la création de ceintures vertes urbaines, pouvant être à l'origine d'un dynamisme des villes (vente directe, AMAP, etc.) et d'une migration des populations.

Dans notre étude, nous nous intéressons principalement à la REUT agricole. Cependant il est important de souligner que la REUT peut s'étendre à des activités urbaines telles que la gestion des espaces verts, des golfs, des voiries et de zones touristiques.

Enfin le détournement de rejets de STEP du milieu récepteur originel (en général des cours d'eaux) à celui des parcelles agricoles peut être source d'une réhabilitation de certaines zones de pêche ou de baignade.

III.2.4. La modification du paysage

La création de ceintures vertes, évoquée précédemment, peut sensiblement modifier l'environnement des villes. De même, le remembrement que peut entraîner la mise en place de projets de REUT pourrait transformer un paysage initialement morcelé en un paysage « uniforme » composé de parcelles de grande taille. Enfin la mise en place des différentes installations pour l'irrigation et pour l'épuration est susceptible de conduire à un changement du paysage.

Conclusion

Si certains effets non-économiques peuvent être traduits en termes financiers, d'autres sont difficilement quantifiables et traduisibles. C'est le cas notamment pour les impacts sociaux. Il est pourtant essentiel de les prendre en compte dans la faisabilité des projets de REUT, même sans chiffrage. Il s'agit donc de s'interroger sur la manière d'évaluer de tels impacts, et ainsi sur les indicateurs pertinents qui pourraient aider à leur interprétation. La partie III présente une tentative de réponse à ces questions.

IV. Proposition d'un guide d'étude de la faisabilité des projets de REUT en irrigation agricole

Dans la mesure du possible, à partir des effets répertoriés et des interdépendances identifiées, nous avons essayé de construire une grille d'étude présentant les différents impacts induits par la REUT, en termes financiers. Cette grille a pour objectif de donner une vision générale des conséquences de la mise en place d'un projet de REUT par un agriculteur ou un groupe d'agriculteurs. Cette outil d'aide à la décision constitue une méthode d'essai et reste de ce fait sujette à des corrections.

IV.1. Principaux déterminants techniques des projets de REUT

L'ensemble des choix techniques d'un projet de REUT va être déterminé par l'utilisation qui sera faite des EUT (cf. Figure 3). En effet, ils seront différents selon :

- ◆ Le type de culture envisagé (pérenne, annuelle, maraîchère) va ainsi conditionner le niveau de qualité d'eau requis, la quantité d'eau nécessaire à la plante, la période d'irrigation et les coûts et les bénéfices liés à la culture choisie.

- ◆ Le débouché considéré (semences, produits alimentaires transformés ou non, etc.) permettra d'identifier également le niveau de qualité demandé par les industriels ou imposé par la réglementation.

La localisation du site va également jouer un rôle majeur dans la détermination des choix techniques (cf. Figure 3). Cela va en effet influencer sur :

- ◆ La taille et les coûts du réseau de distribution à travers notamment la topographie de la zone et la distance entre les parcelles à irriguer et les aménagements épuratoires ;
- ◆ Le remembrement des parcelles selon la répartition des parcelles (parcellaire en mosaïque ou en openfield) et leur positionnement par rapport aux habitations et autres zones de restriction ;
- ◆ Les aménagements possibles *via* ceux disponibles et exploitables (notamment aménagements liés au traitement tertiaire et au potentiel bassin de stockage).

Enfin, la station d'épuration va constituer un déterminant important dans les projets de REUT. En effet, sa taille et sa capacité en sortie vont définir les disponibilités en EUT (volume disponible pour chaque agriculteur et période) et *a posteriori* la nécessité ou non d'aménager un bassin de stockage. Il est essentiel d'observer si le milieu récepteur originel de la STEP nécessite des apports annuels, qui impliqueraient une restriction des prélèvements des agriculteurs en EUT.

Les tableaux présentés en Annexe 24 et en Annexe 25 expliquent les relations entre les différents niveaux de qualité et les traitements tertiaires existants.

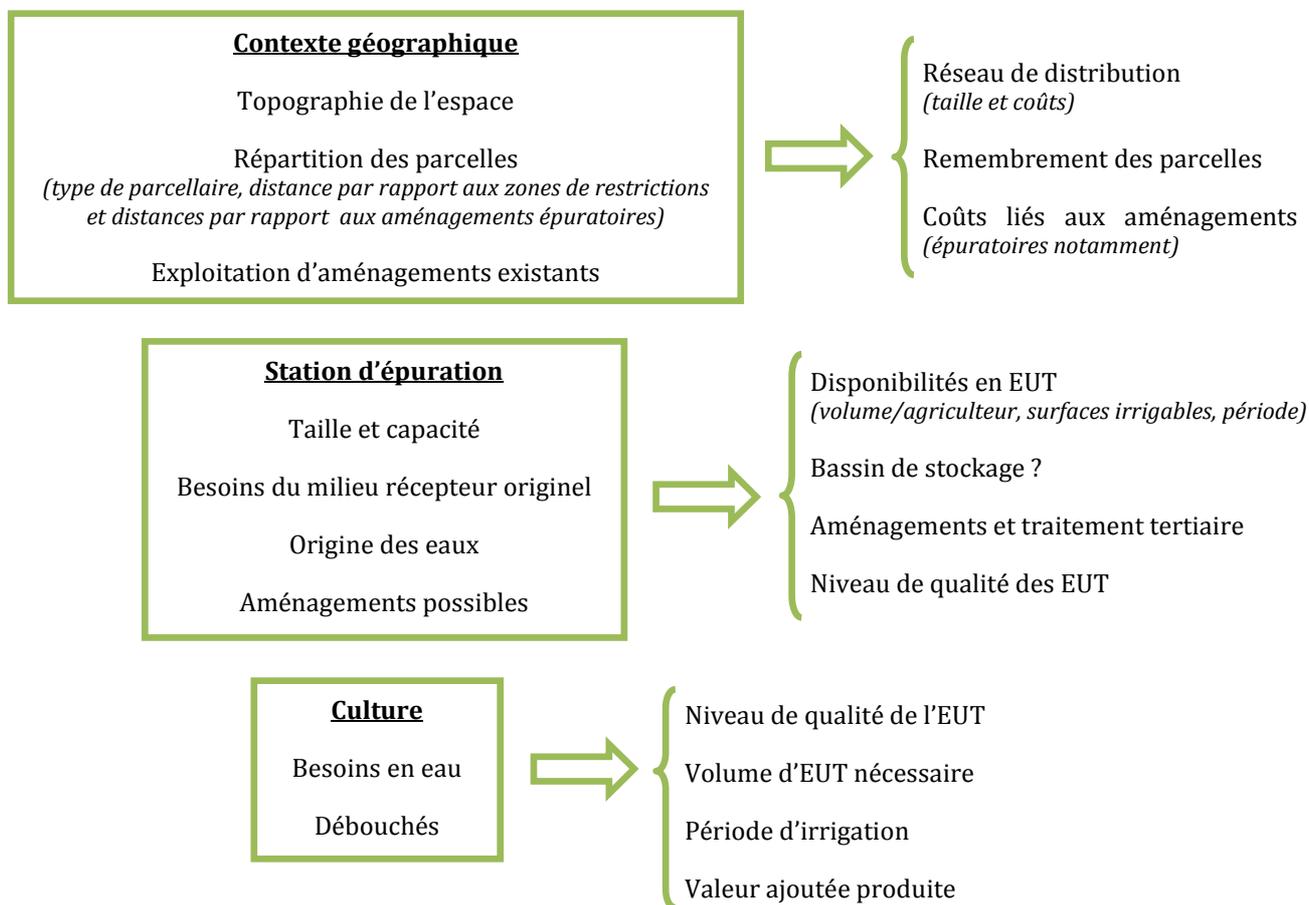


Figure 3 : Principaux déterminants techniques de la faisabilité des projets de REUT.

IV.2. La grille d'analyse des coûts et des bénéfices de la REUT

La grille d'analyse est constituée d'une fiche de renseignements que doit remplir l'agriculteur (cf. Annexe 26), reprenant l'ensemble des paramètres déterminants définis précédemment.

Cette grille est composée de :

- ◆ L'ensemble des coûts et bénéfices financiers relatifs aux différents coûts d'investissement et coûts d'exploitation qu'implique la REUT (cf. Annexe 27) ;
- ◆ L'interprétation économique de certains effets environnementaux (cf. Annexe 28) ;
- ◆ Une proposition d'une approche pour appréhender les impacts sociaux (cf. Annexe 29).

Conclusion et perspectives

L'évaluation des effets directs et indirects de la REUT constitue un exercice complexe de part la diversité des projets, et l'interdépendance des effets. On a cependant été mis en évidence différents éléments de l'influence de la REUT sur les plans financiers, environnementaux et sociaux. Sur le plan financier, des fourchettes de prix à partir de certains cas existants en France ont été établies. Concernant les effets environnementaux et sociaux, une tentative de traduction en termes financiers a été réalisée. Pour certains impacts, notamment sociaux, l'estimation ou la création d'indicateurs n'a pas été possible. La partie III présente des indicateurs de durabilité pouvant rendre compte de ces impacts sociaux. Il serait intéressant de poursuivre cette étude en vue de mieux cerner ces impacts.

La REUT est une activité peu répandue et encore peu connue. Cette rareté des projets rend les recherches de contacts difficiles. Par peur d'une mauvaise acceptabilité de la part des populations, les agriculteurs et les industriels pratiquant la REUT restent discrets sur leurs pratiques. Ceci devrait évoluer dans le futur du fait de la récente parution d'une réglementation définitive en matière de REUT.

Pour enrichir notre étude et affiner les données financières recueillies, nous avons cherché à contacter différents acteurs de la REUT. Nous avons notamment été confronté à des professionnels de l'irrigation et de l'épuration (cf. listes de contacts en Annexe 59, Annexe 60, Annexe 61 et Annexe 62). Concernant les cas de REUT en irrigation agricole, aucune nouvelle enquête pertinente supplémentaire, par rapport au précédent projet de HUARD, QUILY et SORNAY (2010), n'a été trouvée. Nous avons cependant été confrontés à des projets intéressants, nous présentant la réutilisation des eaux usées sous un angle différent. La plupart des cas rencontrés lors de nos enquêtes était initié par des industriels de l'agro-alimentaire recyclant les eaux de rinçage (de produits maraîchers par exemple), n'ayant subi aucun traitement, et n'étant pas sujettes à une classification en niveau de qualité. Nous avons considéré que ces cas ne rentraient pas dans le cadre de notre étude et les avons donc volontairement écartés. En effet, les caractéristiques physico-chimiques et bactériologiques des eaux et les aménagements réalisés sont rigoureusement différents, ce qui implique des impacts autres que ceux répertoriés ici. Il serait cependant intéressant d'étudier ce mode de réutilisation des eaux usées situé à l'interface entre l'industrie et l'agriculture.

PARTIE III : Proposition d'un mode d'évaluation de la durabilité des systèmes

La durabilité est la qualité de ce qui est durable (LAROUSSE, 2001). En droit, il s'agit de la période d'utilisation d'un bien. Dans le domaine de la sûreté de l'environnement, c'est l'aptitude d'un bien à accomplir une fonction jusqu'à ce qu'un état limite soit atteint. Un autre terme est également employé en ce sens, celui de « soutenabilité » construit à partir du concept anglais « sustainability ». Cette notion repose sur le maintien simultané d'un environnement viable, d'un développement économique et d'une organisation sociale équitable. Notre travail s'est attaché à englober l'ensemble de ces définitions dans le cas des projets de REUT.

Notre étude traite avant tout des aspects techniques (aménagements épuratoires, réseau de distribution, bassin de stockage et systèmes d'irrigation). Cette évaluation de la durabilité technique des systèmes a ensuite été complétée par un travail plus théorique visant à commencer à proposer des indicateurs permettant l'évaluation de la durabilité environnementale et socio-économique des systèmes considérés. Pour définir ces systèmes, il est essentiel de bien déterminer l'échelle à laquelle nous nous situons ; nous cherchons à étudier la durabilité technique et économique des exploitations agricoles pratiquant la REUT, situées dans leur environnement.

I. La durabilité technique des systèmes d'irrigation localisée

La notion de durabilité technique est définie par le LAROUSSE (2001) comme « la période d'utilisation d'un bien ». Dans le cadre de notre étude il s'agit d'évaluer la durabilité des systèmes d'irrigation, des systèmes de dépollution, des réseaux de distribution et des bassins de stockage. En d'autres termes, il nous faut étudier la façon d'optimiser leurs durées de vie, à travers des pratiques de maintenance notamment. Cette durabilité est le plus souvent testée en utilisant des procédures de vieillissement accéléré.

On distingue principalement deux types de systèmes d'irrigation : les systèmes gravitaires et les systèmes sous pression qui regroupent les systèmes d'aspersion, et les systèmes d'irrigation localisée. Ces derniers sont réputés plus économes en eau (30 à 60 % par rapport aux systèmes gravitaires), à conditions qu'ils soient correctement gérés. Les systèmes utilisés de nos jours en France, étant essentiellement constitués de systèmes d'irrigation sous pression (96% des SI), nous nous limiterons donc, dans notre étude, aux deux modes d'irrigation sous pression.

La réalisation d'essais sur du matériel de micro-irrigation provenant de divers constructeurs a permis d'évaluer les impacts de la REUT sur la durabilité technique de ces matériels et notamment le besoin en maintenance supplémentaire. La partie qui suit s'articulera autour de la présentation des expérimentations et des résultats obtenus, et de l'interprétation de ces résultats. Des recherches bibliographiques ont permis de recenser des données techniques quant à la maintenance générale des matériels d'irrigation.

Concernant le matériel d'aspersion, peu de données bibliographiques existent. De manière générale, les études en rapport avec l'impact de la REUT sur les différents matériels et aménagements sont rares. Il en est de même concernant les réseaux d'adduction, les aménagements tertiaires et les bassins de stockage. En agriculture, on considère que la durée de vie d'une installation de couverture intégrale est de 10 à 15 ans, d'un canon à enrouleur de 15 à 30 ans, et d'un pivot de 20 à 30 ans.

I.1. Evaluation de l'efficacité d'un matériel de micro-irrigation

I.1.1. Uniformité d'arrosage à la parcelle

Les essais relatifs à l'uniformité d'arrosage sont conduits suivant un protocole relativement simple, consistant à mesurer les distributions de goutteurs représentatifs. Le coefficient d'uniformité d'arrosage (CU), calculé à partir des mesures, donne une indication sur l'homogénéité des distributions (LECLERCQ, 2001). Il se calcule selon la relation :

$$CU = \left(1 - \frac{Q'}{Q}\right) \times 100$$

Avec :

Q : Débit moyen.

Q' : Débit moyen des 4 débits les plus faibles.

CU > 90%	BON	Il n'y a pas lieu d'intervenir sur le réseau.
70% < CU < 90%	MOYEN	Le réseau doit être nettoyé.
70% > CU	MAUVAIS	Il faut rechercher les causes du colmatage et traiter.

I.1.2. Sensibilité des distributeurs au bouchage

Le principal facteur de baisse de l'uniformité est le colmatage progressif des goutteurs par les particules transportées par l'effluent, pouvant se déposer ou donner lieu à la constitution de biofilms. La sensibilité au colmatage va dépendre du dessin du goutteur, ainsi que des conditions du milieu. Ainsi, est-il essentiel de tenir compte de chacun de ces paramètres.

Une série de 9 modèles de goutteurs de différentes marques a été placée en sortie de clarificateur de deux STEP. Nous avons effectué des mesures de débit (L/h) in situ sur un échantillon de goutteurs tout au long de l'expérimentation. L'objectif était de tracer la courbe de variation du débit et de détecter l'intensité et la date d'apparition du phénomène de colmatage, à partir de la variabilité des débits.

La mesure de débit se fait, pour chaque modèle de goutteurs échantillonnés, sur une durée de 10 minutes, par pesée et conversion. Cette simple conversion s'effectue grâce à la formule suivante :

$$Q = \frac{M}{\rho \times t}$$

Q : Débit (en L/h).

M : Masse mesurée (en g).

ρ : Masse volumique de l'eau (1 000 kg/m³ = 1 g/m³ = 1 000 g/L).

t : Temps de mesure (en h).

L'incertitude associée aux débits calculés à partir de cette formule est présentée en Annexe 49.

I.1.3. Pertes de charges

Lorsqu'on considère un fluide réel, les pertes de charge vont dépendre de la forme, des dimensions et de la rugosité de la canalisation, de la vitesse d'écoulement et de la viscosité du liquide, mais pas de la valeur absolue de la pression qui règne dans le liquide.

La formule de Hazen et William permet d'évaluer les pertes de charge résultant du transport de l'eau, le long de la gaine. Elle se traduit par l'équation suivante :

$$J = \left(\frac{3,592}{C}\right)^{11,852} \times \frac{L}{D^{4,87}} \times Q^{1,852}$$

J : Pertes de charge (en m).

L : Espacement entre les goutteurs échantillonnés (en m).

D : Diamètre intérieur de la gaine (en m).

Q : Débit (en m³/h).

C : Coefficient de rugosité de Hazen et William \in [110 ; 150].

C diminue avec l'âge de la gaine, c'est-à-dire avec l'intensité des frottements. Dans notre cas, les gaines utilisées sont neuves. On optera donc pour un coefficient de rugosité de Hazen et William égal à 150.

I.2. Impacts de la REUT sur la durabilité technique des matériels d'irrigation localisée

Afin de déterminer les différents impacts de l'activité de REUT sur les matériels de micro-irrigation, des essais ont été réalisés selon un protocole élaboré par le laboratoire du Cemagref, en s'appuyant sur des protocoles normalisés (ISO et CEN).

I.2.1. Présentation du protocole normalisé utilisé

I.2.1.1. Objectifs des essais réalisés

Nous nous sommes ainsi appliqués à mesurer les effets techniques relatifs notamment à la maintenance et à la variation de la durabilité des systèmes.

Il s'agissait de tester et d'observer en conditions réelles les réactions de matériels de micro-irrigation face à des apports répétés d'EUT. Pour ce faire, deux installations prototypes représentant un réseau de micro-irrigation ont été mises en place à la sortie d'un clarificateur des STEP à boues activées de Fuveau et de Bouc-Bel-Air (cf. **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Ces installations ont été élaborées à partir d'équipements fournis par les trois principaux constructeurs de matériels de micro-irrigation - NaanDanJain (NDJ), Netafim (NTF) et

John Deere Water (JDW) - et suivant leurs prescriptions techniques. Les essais entrepris nous ont permis de suivre le colmatage des distributeurs à travers l'homogénéité des débits sortant des divers goutteurs.

1.2.1.2. Description des différentes séries d'essais

Pour chacune des trois marques, on a disposé trois types de goutteurs : une ligne de gaine d'irrigation, une ligne de goutteurs intégrés (in-line) et une ligne de goutteurs en dérivation (on-line) (cf. Tableau 13). La longueur de chaque ligne est de 20 m. Pour plus de précision, quant aux caractéristiques de ces types de goutteurs, veuillez vous référer à l'Erreur ! Source du renvoi introuvable., à l'Erreur ! Source du renvoi introuvable., à l'Erreur ! Source du renvoi introuvable. et à l'Erreur ! Source du renvoi introuvable..

	Ligne N°	Longueur (m)	Espacement (m)	Débit (*) (L/h)	Pression de service (*) (bar)	Filtration (µm)	Débit cumulé (L/h)
Ligne de gaine d'irrigation	1	40 m	0,30 m	≈ 1 L/h	1 bar	100 µm	135 L/h
	2						
	3						
Ligne de goutteurs intégrés	4			≈ 2 L/h	1 bar	100 µm	270 L/h
	6					130 µm	
	8						
Ligne de goutteurs On-line	5		0,50 m	≈ 4 L/h	2,5 bars	100 µm	335 L/h
	7					130 µm	
	9						

Tableau 13 : Présentation des caractéristiques des différentes lignes d'essais.

(*) Pour plus de précision concernant les matériels utilisés sur les deux sites d'étude, consulter l'Erreur ! Source du renvoi introuvable. et l'Erreur ! Source du renvoi introuvable..

L'ensemble du dispositif expérimental est géré par un programmeur qui déclenche quotidiennement les différentes lignes pour une durée d'une heure.

Chaque semaine des mesures de débit des goutteurs sont effectuées sur chacun des sites. Nos expérimentations ont débuté par la mesure du débit sur chacune des lignes de 18 goutteurs régulièrement espacés et repérés. Par la suite, les échantillons ont été réduits pour ne contenir plus que 6 goutteurs par ligne, afin de réduire le temps de mesure. Un contrôle de la pression en entrée et en sortie ainsi qu'un relevé des compteurs pour chaque type de gaines est effectué à chaque visite.

1.2.1.3. Conditions d'expérimentation

Des tableaux récapitulatifs des conditions d'expérimentation sont disponibles en Annexe 47.

Les essais ont débutés en juillet pour une période de deux ans. La partie traitée ici représente les mesures de mi-juillet à fin octobre. Elles ont ainsi été soumises à des variations de températures (entre 10°C et 37°C approximativement) et des conditions météorologiques diverses. Cependant aucun contrôle de la température n'a été réalisé au cours de nos expérimentations. Le vent, quant à lui, a constitué un véritable obstacle à la précision des mesures (collecteurs renversés, dispersion des gouttes, perturbation de la balance). Nous avons ainsi essayé de prendre en considération ces paramètres dans l'analyse de nos résultats.

Concernant la mise sous pression des distributeurs, nous nous sommes raccordé au système de distribution des eaux industrielles de la STEP⁶. La pression des essais était contrôlée hebdomadairement, en début et fin de rampe, et mesurée à 0,2 bar près par un manomètre ayant une étendue de mesure comprise entre 0 et 4 bars. Des régulateurs de pression permettent en tête de rampe de maintenir la pression en tête au niveau nominal requis. Cependant, ont été observées, au cours des essais, des variations de la pression d'une semaine sur l'autre. Ces variations sont dues au fait que le débit transitant dans le régulateur est juste suffisant pour qu'il fonctionne correctement. Une autre des explications correspond aux importantes variations de pression dans le réseau au cours des cycles de lavage.

Les lignes ont été mises en place sur une surface plane, enherbée, préalablement tondue et recouverte d'un géotextile, afin d'éviter toute pousse trop importante sous les goutteurs.

1.2.1.4. Suivi des essais

Différents suivis ont été effectués au cours de ces expérimentations. Une visite hebdomadaire étaient l'occasion de mesurer les débits sur un échantillon de goutteurs sélectionnés (représentatifs de différentes positions pour

⁶ Il s'agit de l'eau rejetée par la STEP dans le milieu qui est utilisée pour les besoins internes (lavage, etc.).

chacun des modèles et pour chacune des marques), et de contrôler les pressions en entrée et en sortie de chaque ligne.

Un contrôle de l'état des filtres (100µm et 130µm) était également régulièrement effectué, afin de surveiller les pertes de charge dans le filtre. Lorsque celles-ci étaient soumises à une augmentation, un nettoyage du filtre était opéré et le cas échéant une observation des éléments à l'origine du colmatage également.

Nous avons également prévu de prélever et d'analyser les goutteurs que nous jugerions colmatés, mais cela n'a pas été nécessaire, puisqu'aucun colmatage total de goutteur n'a été constaté.

Des variations de débits ont été observées, ce qui a permis de programmer des opérations de maintenance. Un seul nettoyage des gaines a été réalisé sur le site de Bouc-Bel-Air, et ce grâce à une solution de 20 ppm de chlore actif, injectée en aval du filtre. Cette action de maintenance préventive a été opérée deux mois après le début des essais, afin de dégrader les biofilms potentiellement développés. En effet, les hausses estivales de température (jusqu'à plus de 30°C) auraient pu favoriser le développement bactérien et donc la création de biofilms. L'ouverture de goutteurs a permis de montrer que ce n'était pas le cas. (cf. Annexe 47)

1.2.2. Présentation et interprétation des résultats

1.2.2.1. Présentation, interprétation et discussion des résultats des essais réalisés

Afin d'avoir une vision la plus globale possible, nous avons décidé de réaliser différentes modélisations. Ainsi, les données recueillies nous ont permis de tracer différents graphiques en vue d'étudier l'influence de différents facteurs et ainsi de valider ou réfuter nos hypothèses initiales. Nous avons ainsi pu construire :

- ◆ Des courbes représentant l'évolution des coefficients d'uniformité pour chacune des lignes ainsi que des tableaux récapitulatifs (cf. Annexe 39) ;
- ◆ Des courbes représentant l'évolution du débit moyen des différentes lignes au cours du temps (cf. Annexe 40) et en fonction de la position du goutteur (cf. Annexe 42);
- ◆ Des courbes représentant l'évolution des débits au cours du temps par ligne et par goutteur (cf. Annexe 41) ;
- ◆ Des courbes représentant les variations de pertes de charges au cours du temps (cf. Annexe 43) et des tableaux récapitulant les pressions exercées en entrée et en sortie de ligne (cf. Annexe 44).

1.2.2.1.1. Analyse globale du fonctionnement du dispositif expérimental

L'étude des représentations graphiques situées en Annexe 45, en Annexe 46 et en Annexe 47, permet de formuler des hypothèses quant au fonctionnement général des dispositifs expérimentaux mis en place sur les sites de Fuveau et de Bouc-Bel-Air.

a) Evolution du débit moyen en fonction du temps de fonctionnement

Les graphiques, modélisant les variations du débit moyen de chacune des lignes en fonction du temps de fonctionnement, montrent des débits qui restent proches du débit initial. De manière générale, les valeurs prises par le débit moyen, exprimé en pourcentage de la valeur initiale, sont supérieures à 70%. Cette observation nous permet de supposer que globalement aucune des lignes n'a été l'objet de colmatage significatif. Seule la ligne 2 (NTF Gaine Streamline) peut être suspectée. Cette ligne se démarque notamment des autres sur le site de Bouc-Bel-Air ; elle présente en effet un débit généralement inférieur à celui des autres lignes, et à partir de 80h de fonctionnement le débit diminue considérablement pour approcher les 30% du débit initial au bout de 100h. Ce comportement n'est cependant pas vérifiable sur le site de Fuveau, où la ligne 2 conserve cependant un débit généralement inférieur aux autres.

Une analyse de variance sur ces valeurs ne met pas en évidence de comportements communs des variations de débits. On peut donc dire que le dispositif expérimental n'induit pas de réaction particulière des goutteurs, laissant penser que leur comportement est lié à leur conception avant tout. (cf. Annexe 47)

b) Analyse de la variabilité des débits moyens en fonction du temps de fonctionnement

L'observation des courbes relatives à l'évolution des coefficients de variation (CV) en fonction du temps de fonctionnement permet d'aboutir aux mêmes conclusions que précédemment. L'ensemble des lignes présentent, sur les sites de Fuveau et de Bouc-Bel-Air, des CV dont les valeurs sont généralement comprises entre 0 et 20%. Leur comportement est donc considéré comme « normal ». Sur le site de Bouc-Bel-Air, la ligne 2 se détache du lot à partir de 80h de fonctionnement ; on observe une rapide augmentation de son CV. Ces remarques ne sont pas transférables au site de Fuveau.

On considèrera, que les fortes variations du débit résultent de l'inexpérience des opérateurs lors des mesures de débit. Ils ont en effet pu laisser une partie de l'effluent sortant du goutteur échantillonné ou des voisins, ruisseler le long du tuyau, dans ou hors du collecteur.

c) Comparaison entre les volumes relevés aux compteurs et les volumes reconstitués à partir des mesures au niveau des goutteurs

Sur le site de BBA, on observe que les volumes reconstitués sont inférieurs aux volumes relevés sur les compteurs. Cette constatation témoigne de possibles fuites ou d'une surestimation des volumes rapportés par les compteurs.

Sur le site de Fuveau, les volumes reconstitués des lignes 6 à 9 restent légèrement en-dessous de la bissectrice. Cette proximité permet de déduire que le dispositif expérimental fonctionne normalement, si ce n'est quelques fuites au niveau des lignes 6 à 8. Le comportement de la courbe représentant les volumes reconstitués pour les lignes 1 à 5 est par contre anormal. Cela suggère un dysfonctionnement des compteurs en fin d'expérimentation. Les volumes reconstitués vont dépasser la bissectrice pour s'en éloigner. Ainsi, alors que du 16/09 au 28/10, les volumes relevés sur les compteurs ne varient que de 5000 L environ, alors que les volumes reconstitués varieront de 35 000 L. Cette différence est trop importante pour représenter une simple fuite. Comme le dysfonctionnement intervient relativement tard, pour la suite des opérations, il est envisagé de disposer un compteur par ligne.

1.2.2.1.2. Evolution des coefficients d'uniformité (CU) par ligne

Rappelons que les eaux utilisées pour ces essais présentent des caractéristiques physico-chimiques et bactériologiques très similaires. Rappelons également que l'objectif de ces essais est d'observer l'intensité et la date d'apparition du phénomène de colmatage. Ainsi, contrairement à ce qu'il était préconisé dans la partie I.1.1, aucune opération de maintenance n'a été réalisée avant observation de colmatage (CU < 70%).

Les résultats obtenus ne témoignent, à ce stade, d'aucun colmatage des goutteurs. La comparaison des résultats obtenus sur les sites de Fuveau et de Bouc-Bel-Air, ne permet pas d'observer de parallèle dans le comportement des lignes. On ne peut donc faire aucune interprétation généralisable concernant le colmatage des lignes, sur cette durée.

L'observation de l'allure des courbes représentant l'évolution du CU au cours du temps (cf. Annexe 39) conduit à la même remarque. En effet, aucune tendance n'est décelée ; les courbes présentent des comportements très différents d'une ligne à l'autre, et d'un site à l'autre. Ainsi il n'est pas possible de déduire une variation précise de la sensibilité au colmatage des goutteurs selon la filtration réalisée en amont, ou selon le type de goutteur (goutteur monté en dérivation, goutteur intégré ou gaine). En effet, en regroupant les figures par type de goutteur sur les deux sites d'étude ou par calibre de filtration, aucune tendance n'est décelable. Par exemple, les distributeurs intégrés ne semblent pas plus sensibles au colmatage que les goutteurs en dérivation.

Les quelques coefficients d'uniformité considérés comme « mauvais » (CU < 70 %) peuvent s'expliquer notamment par les conditions de travail (cf. Annexe 50). Par exemple, La présence d'un vent fort sur le site de Fuveau, le 20/07 et le 27/07, a renversé certains collecteurs (n°18 pour la ligne 6 et n°15 pour la ligne 4, le 20/07, et n° 12 et 15 pour la ligne 1, le 27/07). Cet élément explique les valeurs faibles des CU correspondants.

Le calcul de l'incertitude des mesures permet également de nuancer certains résultats (cf. Annexe 49). Pour les premières prises de mesures (20/07 et 22/07 pour le site de Fuveau et 27/07 et 29/07 pour le site de BBA), on peut également considérer que notre manque d'expérience, dans le placement des collecteurs sous les goutteurs, a pu influencer sur les données récoltées.

1.2.2.1.3. Evolution des débits moyens au cours du temps

Les débits moyens ont été exprimés en pourcentage des débits nominaux des goutteurs, calculés à partir des lois débit-pression correspondantes. Cette opération permet de gommer l'effet de la pression et d'obtenir une modélisation et une interprétation des débits indépendantes de la variation de la pression. Cependant, nous ne possédions pas la loi débit-pression du goutteur NDJ Gaine Tape. Concernant les gaines JDW T-Tape et NTF Streamline, l'absence de manomètres en entrée nous a empêché de réaliser les calculs. Ainsi, il n'a pas été possible d'exprimer les débits moyens de ces goutteurs en fonction du débit nominal.

Les courbes obtenues permettent d'observer une absence de colmatage, ce qui concorde aux conclusions établies à partir des données relatives aux CU. (cf. Annexe 40)

1.2.2.1.4. Evolution des débits en fonction de la position du goutteur

Les résultats obtenus sur le site de Fuveau semblent montrer que plus on s'éloigne de l'entrée de la rampe, plus les débits moyens semblent diminuer. Cette tendance est-elle simplement liée aux pertes de charge induites par le frottement de l'eau dans la gaine, ou faut-il en déduire un signe de début de colmatage des rampes ?

L'observation des résultats obtenus sur le site de Bouc-Bel-Air ne valide pas la tendance établie pour le site de Fuveau. En effet, mis à part le cas des goutteurs intégrés de NTF et de NDJ, le débit moyen par goutteur semble augmenter le long de la gaine. Cependant, la longueur des lignes étant faible cette conclusion manque de robustesse.

1.2.2.1.5. Variations des pertes de charges au cours du temps

Il a uniquement été possible de calculer les pertes de charges des goutteurs dont nous connaissons l'équation de la loi débit-pression. Nous n'avons donc pu modéliser l'évolution des pertes de charge ni pour les goutteurs autorégulants, ni pour le goutteur NDJ Gaine Tape. Pour obtenir les pertes de charges un calcul itératif a été réalisé dans le sens inverse de l'écoulement, en se basant donc sur la pression délivrée en sortie de gaine. Il s'agissait ensuite d'observer les variations de pertes charges estimées au cours du temps et de les comparer avec les variations de pression mesurées (cf. Annexe 43 et Annexe 44).

Une augmentation des pertes de charge témoigne d'une augmentation des frottements au sein des gaines et donc suggère la présence de dépôts précurseurs de colmatage. L'observation des courbes ne permet pas de conclure sur une obstruction des gaines. En effet, après des fluctuations aléatoires des pertes de charges, une légère augmentation, par rapport à la valeur initiale, est observable pour certaines gaines. Cependant cette variation reste très faible, et occasionnelle.

En comparant les pertes de charges estimées aux variations de pression mesurées, la même tendance ressort. Les pertes de charges sont négligeables par rapport aux variations de pression Cette observation est à nuancer, étant donné que :

- ◆ La formule utilisée pour ces calculs a été initialement conçue pour les systèmes d'irrigation par aspersion.
- ◆ La valeur du coefficient de rugosité a été choisie arbitrairement.
- ◆ Les incertitudes liées à la mesure de la pression sont du même ordre que les variations de pression (de $\pm 0,1$ à $\pm 0,2$ bars).

1.2.2.2. Conclusions et recommandations pour les futurs essais

Il semblerait qu'à ce stade (après 3 mois et demi d'expérimentation), il n'y ait aucun phénomène de colmatage des goutteurs. L'ouverture de goutteurs confirme l'absence de développement de biofilms (cf. Annexe 51). On peut suggérer que les EUT semblent impacter davantage les filtres que les goutteurs. En effet, le nettoyage des filtres a été à plusieurs reprises indispensable (cf. Annexe 50, Annexe 52 et Annexe 53). Ces remarques sont à vérifier au cours de la période d'essais restante.

On peut également s'interroger sur l'influence de la position des goutteurs le long de la ligne sur leur colmatage. En effet, on peut considérer, qu'un goutteur situé en début de ligne (n°3) sera moins sujet aux chutes de pression qu'un goutteur en fin de ligne (n°18) et donc potentiellement moins sensible au colmatage. On peut également se demander si les goutteurs dont la pression de service et le débit nominal sont plus faibles, sont plus sensibles au colmatage. Enfin, l'effet du calibre de la filtration en amont des lignes sur le phénomène de colmatage reste sans réponse.

L'absence de manomètres à l'entrée de certaines lignes (n°1 et n°2) empêche une interprétation correcte des résultats. Dans ce cas, il est en effet difficile de connaître l'influence de la pression sur le débit. Il est également important de régler le problème du régulateur de pression.

Nous nous sommes aperçus, au cours de nos essais, d'un dysfonctionnement des régulateurs de pression. Il semblerait que la membrane soit bloquée ce qui aurait pour effet un réglage faussé de la pression. Ainsi on observe des variations de pression sur une même ligne à des intervalles de temps restreints. L'analyse des débits mesurés par les compteurs placés en entrée des gaines semblent montrer un dysfonctionnement des compteurs. A l'inverse des goutteurs, les électrovannes semblent par contre bien résister au colmatage.

L'absence de certaines lois débit-pression, augmente l'incertitude des interprétations, puisque nous empêche de soustraire l'effet de la variation de pression sur les débits relevés. Il est donc essentiel de récupérer l'ensemble de ces courbes de référence auprès des constructeurs.

Comme il a été expliqué précédemment, le relief irrégulier des sites entraîne l'immersion de certains goutteurs sur lesquelles se développent de façon accentuée des algues qui peuvent être à l'origine d'un colmatage biologique (cf. Annexe 54). La surélévation des goutteurs pourrait constituer une solution à ce problème. Cela permettrait également de supprimer certains renversements dus à la précipitation des mesures. En effet pour placer les collecteurs sous les goutteurs échantillonnés, il faut soulever la ligne d'une quarantaine de centimètres (cf. Annexe 55). Or d'un goutteur à l'autre cette action peut conduire à un déplacement des précédents. Cela donne alors lieu à des erreurs de mesures. Il existe une solution technique que nous n'avons

pas encore considérée, qui pourrait résoudre ce problème. Il s'agit des systèmes d'irrigation utilisés pour les cultures hors-sol. (cf. Annexe 56)

La température peut faire varier la qualité des eaux usées traitées réutilisées et ainsi jouer sur la sensibilité au colmatage des goutteurs. Il serait donc intéressant de rajouter aux suivis réalisés, celui de la température, afin de soustraire son effet potentiel aux résultats obtenus.

Comme nous l'avons vu précédemment, nous distinguons quatre niveaux de qualité possibles pour les EUT réutilisées en irrigation. Il est essentiel de prendre en considération les différents niveaux de qualité utilisés. En effet, selon que l'EUT soit de qualité A ou D, les impacts sur la dégradation des matériels d'irrigation pourraient différer. Les eaux utilisées pour nos essais sont quasiment identiques sur les deux sites d'étude considérés (cf. Annexe 32). Leur niveau de qualité n'est par contre pas déterminé.

Concernant les techniques de maintenance des filtres et des gaines, la comparaison de l'efficacité de maintenance préventive et corrective serait intéressante.

I.2.2.3. Evaluation des dépenses de maintenance comme indicateur de durabilité technique

Les dépenses liées à la maintenance se caractérisent par leur croissance régulière tout au long de la durée de vie des équipements. Cette évolution s'effectue de manière exponentielle, selon la formule suivante.

$$b = \left(\frac{f_T}{f_i}\right)^{\frac{i}{T-1}} - 1$$

Source : (GLEYSES, LOUBIER et TERREAUX, 2001)

i : Année i.

b : Taux de croissance des coûts de maintenance.

T : Durée de vie de l'équipement.

V : Valeur de l'équipement.

Maintenance : f_i % de la valeur actuelle du bien l'année i et f_T % lors de la dernière année d'utilisation.

Les coûts de maintenance (M_i) pour le bien étudié, au cours de l'année i, sont connus de la première à la dernière année. Leur évolution est exponentielle entre ces bornes. Ils s'expriment comme ci-dessous :

$$M_i = f_i (1 + b)^{i-1} V = V f_i \left(\frac{f_T}{f_i}\right)^{\frac{i-1}{T-1}}$$

Source : (GLEYSES, LOUBIER et TERREAUX, 2001)

Au stade actuel des expérimentations menées sur le matériel de micro-irrigation, il semblerait, que la principale conséquence technique de la REUT se manifeste à travers les diverses opérations de maintenance (sur les filtres, sur les gaines, etc.). Les dépenses en maintenance pourraient donc s'avérer être un indicateur de la durabilité technique des systèmes d'irrigation localisée.

II. Estimation de la durabilité agro-écologique, socio-territoriale et économique des systèmes étudiés

Une exploitation agricole (EA) est dite économiquement durable lorsque son activité permet d'assurer sa pérennité. Il s'agit donc ici d'analyser le capital « économique » directement issu de la production, le capital « humain » (sécurité du travail, qualité de vie, etc.), ainsi que le capital agronomique.

Une EA est dite durable d'un point de vue environnemental, lorsque ses pratiques conduisent à la conservation ou la modification d'un environnement qui répond aux besoins de la génération actuelle sans compromettre la capacité des générations futures à satisfaire leurs propres besoins. (GENESE0, 2010)

D'après BOURDAIS et al. (2001), l'étude de la durabilité des EA implique l'analyse des relations entre l'agriculture et les écosystèmes, et des interactions entre les agriculteurs et la société à laquelle ils appartiennent. Elle doit prendre en compte simultanément des composantes économique, écologique et sociale.

II.1. Méthodologie adoptée pour la détermination des indicateurs de durabilité

Il existe différentes méthodologies permettant d'évaluer la durabilité d'une exploitation agricole. Ces méthodologies se basent sur l'élaboration d'indicateurs pertinents répondant à la problématique initialement posée. Pour notre étude, nous nous sommes appuyés sur une de ces méthodes : la méthode IDEA (Indicateurs de Durabilité des Exploitations Agricoles). Nous avons sélectionné les indicateurs les plus pertinents pour

notre problématique : « Quels sont les impacts de la réutilisation des eaux usées traitées sur la durabilité d'une exploitation agricole ? ». Nous nous sommes ensuite attachés à ajuster les barèmes de notation et à essayer d'élaborer de nouveaux indicateurs couvrant des aspects non abordés dans l'IDEA.

II.1.1. Quelques définitions

II.1.1.1. Qu'est-ce que la méthode IDEA ?

La méthode IDEA vise à intégrer un ensemble d'indicateurs pour évaluer la durabilité et constituer un outil d'aide à la décision. Elle permet d'évaluer la durabilité d'une exploitation agricole, dans sa composante économique, sa composante agro-écologique et sa composante socio-territoriale. La méthode IDEA débouche ainsi sur trois évaluations conjointes qui permettent de porter un regard systémique

Cette méthode repose sur l'hypothèse qu'il est possible de quantifier les diverses composantes d'une EA en leur attribuant une note chiffrée, puis de pondérer et d'agrèger les informations obtenues pour obtenir un score de l'EA par rapport aux trois échelles énumérées précédemment. L'intérêt de l'IDEA est à la fois de permettre un suivi individuel des exploitations dans le temps et de conduire un travail de groupe pour comparer des exploitations entre elles et apprécier comment chacune d'entre elles peut progresser vers la durabilité.

II.1.1.2. Définition d'un indicateur

Un indicateur est une variable qualitative ou quantitative qui permet d'apprécier de manière simplifiée un phénomène abstrait. Il s'agit donc de variables qui fournissent des renseignements sur d'autres variables plus difficiles d'accès (BENOIT et al., 1989). Il traduit un ensemble de données en une information compréhensible, soit en agrégeant les données de façon synthétique, soit en choisissant un seul fait représentatif pour tous les autres faits en question.

Dans une démarche d'évaluation, l'indicateur est utilisé comme variable positionnée par rapport à une référence, à un seuil. Il peut ainsi s'avérer être un repère dans la prise de décision, ou être utilisé pour la mesure d'un objectif à atteindre. Pour cela, l'indicateur doit bien correspondre à la mesure du problème en question, le suivi doit être fait à des intervalles de temps réguliers et en rapport avec le phénomène étudié. (CARRIERE, 2005)

Un indicateur doit répondre aux caractéristiques suivantes. Il doit être objectif, scientifiquement fondé, sensible, facile d'accès, immédiatement compréhensible et pertinent par rapport à la problématique considérée. (BOURDAIS et al., 2001)

Le nombre des indicateurs retenus peut poser problème. Il doit être suffisamment élevé pour rendre compte de l'ensemble du système étudié, mais doit rester limité. En effet un nombre trop important d'indicateurs entraîne un risque de redondance et donc de confusion. (BOURDAIS et al., 2001)

Outre les caractéristiques auxquelles doit répondre un indicateur et la prise en compte du risque de redondance, le choix des indicateurs va être fonction du temps de collecte des données, de la complexité de calcul et d'interprétation des indicateurs et de leur précision.

II.1.2. Comment déterminer les indicateurs de durabilité ?

II.1.2.1. Construction et sélection des indicateurs de durabilité

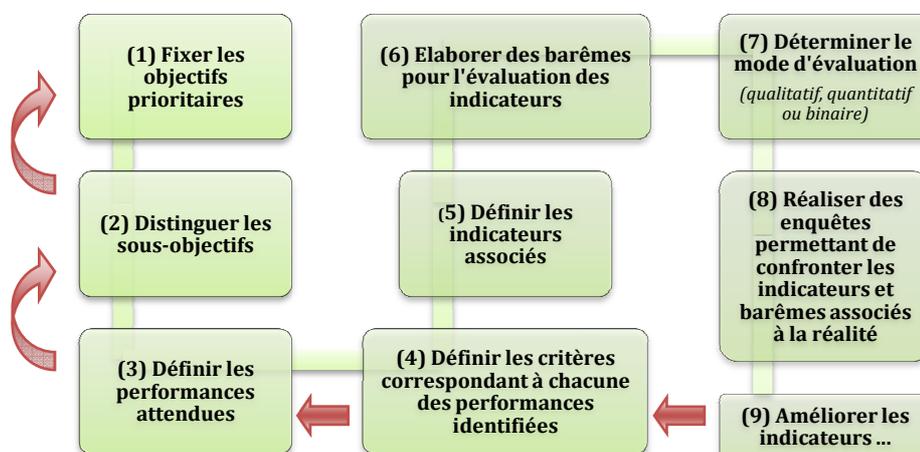


Figure 4 : Organigramme de la démarche adoptée pour la construction des indicateurs de durabilité.

Pour construire nos indicateurs de durabilité, nous nous sommes inspirés d'expériences précédentes relevées dans la bibliographie, dont notamment la thèse de A. BENZERRA (2010). Nous avons ainsi suivi la démarche présentée dans la Figure 4. L'ensemble des objectifs prioritaires, sous-objectifs et critères sont répertoriés dans l'Annexe 57.

II.1.2.2. Adaptation des barèmes de notation

Des notes maximales et minimales sont attribuées à chacun des indicateurs identifiés. Le score d'une exploitation pour chacune des échelles considérées correspond à la somme de l'ensemble des notes attribuées à chacun des aspects pris en compte.

La note minimale associée à la plupart des indicateurs est la note zéro. Cette note peut simplement signifier que l'EA n'est pas concernée par l'indicateur, ou que l'EA peut avoir des marges de progression importantes. Il est également possible d'attribuer des notes négatives, synonymes de situations critiques relatives à la durabilité.

Les notes maximales traduisent le poids accordé à chaque indicateur. De ce fait les indicateurs sont hiérarchisés entre eux ; les indicateurs considérés les plus fondamentaux et généraux ont plus de poids que les indicateurs plus spécifiques.

Il est important de préciser que les documents récupérés, relatifs à la notation des indicateurs, sont confidentiels.

II.2. Présentation des critères de durabilité agro-écologique (IDEA)

II.2.1. Diversité culturelle

Indicateurs		Valeur maximale
Diversité des cultures annuelles ou temporaires	A1	15
Diversité des cultures pérennes	A2	15

Tableau 14 : Indicateurs du domaine de la diversité.

Source : (BOURDAIS et al., 2001).

La valorisation des aménagements coûteux réalisés pour la REUT peut conduire l'agriculteur à favoriser (en termes d'espace et de ressources) les cultures à forte valeur ajoutée. Une diminution de la diversité paraît dès lors possible. Prenons l'exemple de l'ASA Limagne Noire de Clermont-Ferrand. Les parcelles concernées par la REUT ont vu progressivement leur surface en betteraves diminuer, pour laisser place au maïs semence pour lequel les agriculteurs avaient un contrat avec des industriels. Inversement, la REUT peut interdire certaines productions ou certains contrats.

II.2.2. Organisation de l'espace

Indicateurs		Valeur maximale
Répartition de l'assolement par culture	A5	10
Dimension des parcelles	A6	8
Présence de zones de régulation écologique	A8	12
Valorisation de l'espace	A10	5
Mode de gestion des surfaces fourragères	A11	3

Tableau 15 : Indicateurs du domaine de l'organisation de l'espace.

Source : (BOURDAIS et al., 2001).

Il est possible d'observer une évolution des assolements comme alternative contre la salinisation du sol, ou suite aux aménagements réalisés. Ainsi, l'indicateur A5 proposé dans la méthode IDEA évoluera-t-il.

La mise en place d'un projet de REUT peut impliquer un remembrement des parcelles afin de faciliter la mise en place de réseau d'adduction de la STEP aux parcelles, et la délimitation des périmètres de protection rapprochée. Le parcellaire en deviendra donc moins morcelé ; la dimension des parcelles pourra être modifiée (indicateur A6).

Concernant l'indicateur relatif à la présence de zones de régulation écologique (A8), il faudrait se demander si les périmètres de protection rapprochée rentrent dans ce cadre.

Si un contrat oblige les agriculteurs à épandre des EUT tout au long de l'année, ceux-ci peuvent en période hivernale épandre les EUT sur les prairies où des animaux leur appartenant ou non viendraient paître, ou alors valoriser ces prairies par la vente de foin à des éleveurs. Dans tous les cas, cela impliquerait un changement

dans le mode de gestion des surfaces fourragères et conduirait à une meilleure valorisation de l'espace (A10 et A11).

II.2.3. Pratiques agricoles

Indicateurs		Valeur maximale
Fertilisation	A12	8
Pesticides	A14	13
Traitements vétérinaires (TV)	A15	3
Technique de protection des sols	A16	5
Gestion de la ressource en eau	A17	4
Dépendance énergétique	A18	10

Tableau 16 : Indicateurs du domaine des pratiques agricoles.
Source : (BOURDAIS et al., 2001).

Il s'agit ici d'étudier la reproductibilité environnementale des écosystèmes, c'est-à-dire la prise en compte de l'impact des pratiques agricoles sur les milieux, afin que l'agriculture ne dénature pas l'environnement.

La teneur en éléments nutritifs des EUT doit être intégrée dans le plan de fertilisation des cultures concernées. Ainsi, l'indicateur A12 évoluera probablement. Il est également possible d'observer des effets négatifs induits (par la différence entre la disponibilité et le timing). Ainsi peuvent s'accumuler dans le sol certains éléments indésirables à trop grande concentration.

La question des traitements phytosanitaires (A14) doit être posée. En effet, nous ne connaissons pas encore l'influence de la REUT sur la consommation en pesticides. Certaines opérations de désinfections pourraient être requises.

Concernant la santé des animaux, aucun effet n'est *a priori* à craindre, si les périodes de non-pâturage prescrites par l'arrêté sont respectées. Cet indicateur est évalué à partir du calcul du nombre de traitements vétérinaires effectués (cf. Tableau 17 : Barème d'évaluation de l'indicateur « Traitements vétérinaires ».Tableau 17).

Indicateur	Barème	Points
$TV = \frac{Nb \text{ traitements} \times Nb \text{ d'animaux}}{Effectif \text{ cheptel total}}$	< 0,5	3
	0,5 < TV < 1	2
	1 < TV < 2	1
	2 < TV	0
	0	1

Tableau 17 : Barème d'évaluation de l'indicateur « Traitements vétérinaires ».
Source : (BOISSET et al., 2007).

La REUT risque de détériorer les caractéristiques physico-chimiques du sol (salinisation, accumulation des nitrates). Ceci va impliquer l'adaptation des pratiques culturales en vue de protéger la ressource sol (A16).

La dépendance énergétique va être fonction de la période d'irrigation fixée (imposée ou non) et du type de matériel utilisé. Par ailleurs, cette nouvelle activité qui demande rigueur et maintenance va impliquer de nombreux déplacements notamment lors de la mise en place des aménagements et lors des premières campagnes d'irrigation. On peut donc supposer que les dépenses énergétiques vont avoir tendance à augmenter (A18).

II.3. Présentation des critères de durabilité socio-territoriale

Le diagnostic de durabilité socio-territoriale de la méthode IDEA recense 4 sous-objectifs : la qualité des produits et du territoire, l'emploi et les services, l'éthique et le développement humain. Dans le cadre de notre étude, nous n'analyserons que les critères susceptibles d'évoluer suite à un projet de réutilisation des eaux usées traitées en irrigation agricole.

II.3.1. Qualité des produits et du territoire

Indicateurs		Valeur maximale
Démarche de qualité	B1	10
Gestion des déchets non-organiques	B3	5
Accessibilité de l'espace	B4	5
Implication sociale	B5	6

Tableau 18 : Indicateurs relatifs à la qualité des produits et du territoire.
Source : (BOISSET et al., 2007).

L'indicateur B1 pose la question de l'interdiction ou non de la pratique de la REUT par certains cahiers des charges des différentes démarches qualité.

L'impact technique de la REUT sur les différentes installations est peu connu. Cependant, étant donné la composition des EUT et la possible obligation d'irriguer tout au long de l'année, il existe un risque relatif aux renouvellements plus fréquents des SI. L'indicateur B3 risque donc de sensiblement évoluer, notamment en irrigation localisée dont le matériel est composé de matériaux difficilement recyclables.

L'accès à l'espace, évaluable *via* l'indicateur B4, peut être limité du fait du périmètre de protection rapprochée imposé.

Enfin, la mise en place de projets de REUT implique le regroupement des agriculteurs en ASA (Association Syndicale Autorisée). Cette activité requiert donc une implication sociale de la part des agriculteurs, ce qui conduira à un changement de l'indicateur B5.

II.3.2. Emplois et services

Indicateurs		Valeur maximale
Autonomie et valorisation des ressources locales	B7	10
Services, pluriactivité	B8	5
Contribution à l'emploi	B9	6
Travail collectif	B10	5
Pérennité globale	B11	3

Tableau 19 : Indicateurs relatifs aux emplois et aux services.

Source : (BOISSET et al., 2007).

L'indicateur B7 permet d'évaluer l'autonomie de l'exploitation et la valorisation des ressources locales. Si l'on considère la REUT comme activité permettant de valoriser des « déchets », alors il serait intéressant d'intégrer la REUT ici.

De la même façon, si la valorisation des boues urbaines entre dans le critère B8, alors on peut envisager que la valorisation des eaux usées urbaines soit soumise au même traitement.

Le regroupement en ASA des agriculteurs va induire un travail collectif entre eux (concertation, réunion, etc.), mais également avec les communes (STEP, mairie et préfecture). L'indicateur B10 est donc susceptible d'être modifié.

L'objectif de la REUT est de sécuriser la ressource en eau et ainsi la production. Elle cherche donc à garantir la pérennité globale de l'exploitation (indicateur B11).

II.3.3. Éthique et développement humain

Indicateurs		Valeur maximale
Contribution à l'équilibre alimentaire mondiale	B12	10
Formation	B14	6
Intensité du travail	B15	7
Qualité de vie	B16	6
Isolement	B17	3
Accueil, hygiène et sécurité	B18	4

Tableau 20 : Indicateurs relatifs à l'éthique et au développement humain.

Source : (BOISSET et al., 2007).

La REUT par la sécurisation de la production, voire par son amélioration, va contribuer à l'équilibre alimentaire mondial (indicateur B12). Cet indicateur est évalué via le calcul du taux d'importation (TI) défini de la façon suivante : $TI = \frac{\text{Surface importée}}{SAU}$ (K. BOISSET, P. GIRARDIN, A. GUILLAUMIN, C. MOUCHET, P. VIAUX, L. VILAIN et F. ZAHM, 2007)

La REUT va nécessiter la mise en place de formation spécifique pour les agriculteurs. Ainsi, l'indicateur B14 sera-t-il susceptible d'évoluer.

Il en est de même pour l'indicateur B15, puisque la REUT, selon la période d'irrigation imposée, va demander une rigueur et une intensité de travail amplifiées, notamment au cours des premières années. Et si la REUT influe sur l'intensité de travail, alors elle aura également un effet sur la qualité de vie des agriculteurs (indicateur B16). La qualité de vie constitue un critère subjectif, nécessitant une auto-évaluation de la part de l'agriculteur. En effet, cette notion va varier selon la personne enquêtée. L'agriculteur devra ainsi s'attribuer une note en précisant les mots-clés qu'il associe à la notion de « qualité de vie ». Par qualité de vie, on peut

considérer la fréquence des vacances, les conditions et le temps de travail, la situation géographique de la ferme, le stress, etc. (CIVAM, 2001)

L'isolement géographique des agriculteurs est une possibilité dans la mesure où l'acceptabilité est mauvaise, et que les périmètres de protection rapprochée établis les isolent. Dans ce sens, l'indicateur B17 doit être surveillé.

Concernant l'indicateur B18, la manipulation d'EUT, contenant à certain seuil des pathogènes, augmentent les risques sanitaires.

II.4. Présentation des critères de durabilité économique

On distingue die nombreux critères de durabilité économique : l'efficacité économique, l'autonomie, l'efficacité technique, le taux de spécialisation, les contraintes structurelles, la sensibilité aux aides liées directement à la production, l'autonomie financière, l'efficacité du capital, la sécurisation des revenus. Pour estimer la durabilité économique d'un projet de REUT nous avons sélectionné les critères présentés ci-après.

II.4.1. Viabilité économique

II.4.1.1. Viabilité économique (VE)

La viabilité économique constitue un indicateur de rentabilité globale. Elle implique la sécurisation économique des sources de revenu face aux aléas du marché et aux incertitudes qui pèsent sur les différentes aides directes (BOURDAIS, BRIQUEL, GIRARDIN, MOUCHET, VIAUX et VILAIN, 2001). La REUT entraîne en général la mise en place de culture à forte valeur ajoutée. Ainsi la viabilité économique (C1) variera-t-elle.

$$VE = \frac{EBE - BF}{UTH \text{ non salariée}}$$

Avec :

BF = Besoin de financement = ($\frac{1}{2}$ amortissements) + (Σ annuités)

II.4.1.2. Taux de spécialisation économique

La création de contrats privilégiés avec des industriels (IAA, semenciers, etc.) peut pousser l'exploitation à une spécialisation. Ainsi, l'indicateur C2 relatif au taux de spécialisation est-il susceptible d'évoluer. Il s'exprime en pourcentage et se calcule de la manière suivante :

$$\text{Taux de spécialisation économique} = \frac{CA}{PB} \times 100 = \dots \%$$

Source : (CIVAM, 2001).

Avec :

CA : Chiffres d'Affaires des ateliers concernés par la REUT (en €).

PB total d'exploitation : Produit Brut total de l'exploitation (en €).

II.4.2. Indépendance

L'indépendance est définie, selon la méthode IDEA, à travers la sensibilité aux aides de l'EA. Cet indicateur traduit la dépendance de l'agriculteur aux aides directes qui sont liées au système de production. Les aides doivent être les plus réduites possibles. L'idéal est de ne dépendre d'aucune aide (CIVAM, 2001). Par l'entreprise d'un projet de REUT, l'agriculteur peut bénéficier de subventions de la part des collectivités, de l'Etat, voire de l'Europe. Ce critère est donc très susceptible d'évoluer. En effet, la part des subventions est très importante dans ce type de projet, notamment pour son lancement. Ensuite, c'est le prix du m³ d'eau qui peut représenter une subvention déguisée.

Indicateur	Barème	Points	Interprétation
$\text{Sensibilité aux aides} = \frac{\text{Aides}}{\text{Résultat courant}}$	> 45 %	0	Dépendance maximale
] 35 % ; 45 %]	1	
] 25 % ; 35 %]	2	
] 15 % ; 25 %]	3	
] 5 % ; 15 %]	4	
< 5 %	5	Durabilité optimale	

Tableau 21 : Barème d'évaluation du critère « sensibilité aux aides ».

Source : (CIVAM, 2001).

II.4.3. Efficience du processus productif

La REUT peut conduire à une diminution de la consommation en intrants ainsi qu'à une augmentation de la production. Cette activité peut donc jouer sur les deux aspects de l'efficienc

e du processus productif. En effet, l'efficience du processus productif est définie par la formule suivante :

$$Efficienc$$
e =
$$\frac{Produit - Intrants}{Produit}$$

Source : (BOISSET et al., 2007).

Conclusion et perspectives

Les barèmes de notation sont confidentiels. Il m'est donc impossible de développer ici cet aspect. L'adaptation des indicateurs de la méthode IDEA à l'activité de REUT est en cours de discussion. Ce travail permettrait au Cemagref d'avancer dans sa recherche pour la valorisation de la REUT et pourrait conduire à une évolution de la méthode IDEA. En effet, il s'agirait d'intégrer directement cette activité nouvelle dans certains indicateurs (par exemple : « Autonomie et valorisation des ressources locales »).

Il s'agira ensuite de confronter à la réalité les indicateurs sélectionnés et adaptés. Pour cela, nous avons pensé prendre trois exploitations agricoles témoins ayant réalisé une analyse de durabilité *via* la méthode IDEA. Une grande diversité de cas est en effet disponible dans les archives. Il est ainsi possible de trouver des exploitations comparables à des cas existants d'exploitations pratiquant la REUT : exploitations maraîchères, exploitations polyculture-élevage, exploitations arboricoles. La détermination des exploitations témoins est également en cours de discussion.

Conclusion et perspectives

Cette étude contribue à la valorisation de la Réutilisation des Eaux Usées Traitées (REUT) en irrigation agricole, en France. Elle a finalement permis, grâce aux enquêtes et aux recherches bibliographiques :

- ◆ D'identifier les effets directs et indirects de la REUT à l'échelle des agriculteurs et d'en faire ressortir la complexité due aux interdépendances existant entre eux ;
- ◆ D'appréhender les principaux facteurs à l'origine de la diversité des impacts répertoriés ;
- ◆ De réaliser une ébauche de fiche de calcul destinée à évaluer l'ensemble des coûts et des bénéfices, économiques et non-économiques, induits par les projets de REUT ;
- ◆ De proposer une liste d'indicateurs économiques, socio-territoriaux et agro-écologiques pertinents pour évaluer les projets de REUT ;
- ◆ De comprendre l'influence, sur le plan technique, de la REUT sur les matériels d'irrigation localisée et de proposer des premières recommandations techniques en matière de maintenance des SI utilisés pour la REUT en irrigation agricole ;
- ◆ De créer les bases d'un outil de négociation pour les constructeurs, les collectivités et les agriculteurs et de mettre à la disposition des différents acteurs de la REUT un ensemble de références technico-économiques actualisées et synthétisées concernant cette activité.

La REUT est une activité encore peu répandue en France. Cette réalité a rendu les recherches de contacts et d'informations difficiles. Par peur d'une mauvaise acceptabilité de la part des populations, les agriculteurs et les industriels pratiquant la REUT restent discrets sur leurs pratiques. Ceci devrait évoluer dans le futur du fait de la récente parution d'une réglementation définitive en matière de REUT.

Sur le plan financier, des fourchettes de prix à partir de certains cas existants en France ont été établies. En revanche, si certains effets non-économiques ont pu être traduits en termes financiers, d'autres, tels que les impacts sociaux, restent difficilement évaluables. Il est pourtant essentiel de prendre en compte cette dimension dans la faisabilité des projets de REUT. Il s'agit donc de s'interroger sur la manière d'estimer de tels impacts, et ainsi sur des indicateurs qui pourraient aider à leur interprétation. La poursuite de cette étude serait intéressante, notamment à l'échelle des collectivités et des agriculteurs, qui pourraient ainsi valoriser leur projet par exemple auprès des Conseils Régionaux et Généraux susceptibles de débloquent des fonds pour les financements.

Concernant l'évaluation de la durabilité des projets de REUT, l'adaptation des indicateurs sélectionnés parmi ceux proposés par la méthode IDEA à cette activité, est en cours de discussion. Les barèmes de notation sont actuellement en étude ; ils vont notamment évoluer selon l'importance des critères considérés dans un projet de REUT. Une confrontation à la réalité sera ensuite nécessaire afin d'évaluer la pertinence des indicateurs sélectionnés et de leur notation. Ce travail sur la durabilité permet d'avoir une vision à long terme des projets et vient ainsi compléter le répertoire des coûts et bénéfices relatifs à l'étude de faisabilité technico-économique des projets de REUT.

Les recherches bibliographiques effectuées ont mis en évidence l'absence de données quant à l'impact de la REUT sur la maintenance et la durée de vie des différents équipements et installations relatifs à l'épuration, à l'irrigation, à l'adduction ou au stockage. Le matériel d'irrigation localisée, testé jusqu'à maintenant, ne présente aucun signe de colmatage des goutteurs. Les EUT semblent impacter davantage les filtres que les goutteurs. On peut suggérer qu'avec une chloration régulière des gaines (environ une par mois) et un nettoyage fréquent des filtres en amont, le matériel utilisé ne devrait pas subir de renouvellement précoce. Ces remarques sont à vérifier au cours de la période d'essais restante, au cours de laquelle certains paramètres techniques sont à modifier (régulateur de pression, compteurs, manomètres, lois débit-pression des goutteurs, collecteurs, thermomètre, etc.). Des expérimentations complémentaires seraient également intéressantes, telles que l'étude du colmatage des filtres, l'étude de l'impact à long terme des chloration régulières sur le sol, la comparaison de l'impact des différents niveaux de qualité des EUT sur la dégradation des matériels d'irrigation.

Pour conclure, je précise que les enquêtes réalisées nous ont confrontés à des cas intéressants de recyclage des eaux usées non-traitées (et donc non-abordés ici), telles que les eaux de rinçage d'IAA (de produits maraîchers ou autres) ou encore les solutions de drainage de cultures horticoles hors-sol. Ces eaux présentent notamment l'avantage de ne nécessiter aucun traitement, donc de ne pas demander d'aménagements épuratoires (généralement coûteux) et de diminuer les contraintes dues au contexte géographique et aux pratiques culturales. Ces techniques demanderaient à être explorées pour compléter cette étude réalisée sur la REUT et mieux en évaluer les intérêts et les limites.

BIBLIOGRAPHIE

- AFSSA, 2008, *Réutilisation des eaux usées traitées pour l'arrosage ou l'irrigation*, saisine n°2001-SA-0075 : Avis relatif à un projet d'arrêté fixant les prescriptions techniques, les modalités de mise en œuvre et de surveillance applicables à l'utilisation d'eaux issues du traitement d'épuration des eaux résiduaires des collectivités territoriales pour l'arrosage ou l'irrigation de cultures ou d'espaces verts, France, 71 p.
- O. AGHAI et R. CHOUKR-ALLAH 2005, *Impact de l'irrigation par les eaux usées épurées sur la productivité d'une culture de tomate de plein champ, la salinité du sol et le bilan azote*, Salinity and plant nutrition laboratory I.A.V Hassan II, Agadir, Maroc, pp. 165-171.
- AGRO-TRANSFERT 2008, *Méthode de calcul des indicateurs DAE-G*, Ressources et Territoires, Projet "Management environnemental des exploitations agricoles", France, 181 p.
- T. ALOUI et al. 1997, *Les externalités négatives de l'utilisation des eaux usées traitées en agriculture*, Options Méditerranéennes, Sér. A/n°31, Ecole supérieure d'agriculture de Mograne, Zaghouan, Tunisie, pp. 194-215.
- ARPE 2010a, *Diagnostic de fonctionnement de la station d'épuration de Bouc-Bel-Air*, Bouc-Bel-Air (13), France, 6 p.
- ARPE 2010b, *Diagnostic de fonctionnement de la station d'épuration de Fuveau*, Fuveau (13), France, 6 p.
- A. ARRIGHI DE CASANOVA et N. HABJOKA 2009, *Moderniser l'agriculture irriguée au Proche-Orient – Retour d'expérience sur l'engagement de la Mission Régionale Eau et Agriculture (1993-2007)*, IPTRID-afd-FAO, Rome, Italie, 114 p.
- M-G. BARBIER 1955, *Essai de définition de la fertilité des sols*, volume 23, Versailles, France, pp. 3-6.
- C. BARNETCHE 2007, *La réutilisation des eaux usées traitées pour l'irrigation des golfs en France et dans le monde : exemples, motivations, contraintes sanitaires, techniques et aspects pratiques*, OIEAU, Limoges, France, 17 p.
- S. BAUMONT 2004, *Réutilisation des eaux usées épurées : risques sanitaires et faisabilité en Île-de-France*, ORS Ile de France, France, 222 p.
- A. BENZERRA 2010, *Méthodologie pour l'évaluation de la durabilité en matière d'assainissement urbain*, Laboratoire de Génie Civil et Ingénierie Environnementale (LGCIE), Séminaire doctorants 2010, Valgrisenche, Italie, 20 p.
- D. BIXIO et T. WINTGENS 2006, *Water Reuse System Management Manual*, SQUAREC, European Commission, 680 p.
- K. BOISSET et al. 2007, *IDEA - Indicateurs de durabilité des exploitations agricoles*, Groupe du Vercors, Ministère de l'agriculture et de la pêche, 16 p.
- A-M. BOLAND et al. 2006, *Using Recycled Water in Horticulture, A growers guide*, Melbourne, Australie, 28 p.
- O. BORRAZ 2000, *L'épandage des boues d'épuration en agriculture : L'analyse des sciences humaines*, Colloque Hydrosphère, Paris, 7 p.
- N. BOURCHICH 2004, *Gestion de la rareté et valorisation de l'eau d'irrigation : cas du périmètre de Doukkala*, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rabat, Maroc, pp. 48-60.
- J-L. BOURDAIS et al. 2001, *La méthode IDAE (indicateurs de durabilité des exploitations agricoles) : une démarche pédagogique*, Ingénieurs n°25, France, pp. 29-39.
- N-C. BRADY 2002, *The nature and properties of soils*, New Jersey, Etats-Unis, pp. 1-2.
- J-P. CARRIERE 2005, *La mise en œuvre de système d'indicateurs locaux du développement durable, à partir d'une comparaison franco-allemande*, Programme de recherche, Politiques territoriales et développement durable, Ecole Polytechnique de l'Université de François Rabelais, Tours, France, 172 p.

- Z. CHÂABOUNI et al. 2002, *Optimisation et durabilité du traitement et de l'utilisation des eaux usées en agriculture*, Institut National de Recherche en Génie Rural, Eaux et Forêts, Tunisie, 74 p.
- CIVAM 2001, *Diagnostic de durabilité*, Guide de l'utilisateur, Réseau agriculture durable, Chantepie, France, 11 p.
- CNRS 2010, « La consommation française domestique, industrielle et agricole », <http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/doseau/decouv/france/11_consommation.htm>, consulté le 09/09/2010.
- J. COLLINS et al. 2009, *Durabilité environnementale*, ROOTS 13, Tearfund, Teddington, Royaume-Uni, 100 p.
- S. COMBE 2008, *Synthèse annuelle des résultats d'autosurveillance pour l'année 2008 – Station d'épuration de FUVEAU/Intercommunale*, ARPE, Fuveau, France, 17 p.
- S. COMBE et A. VAHTAR 2008, *Synthèse annuelle des résultats d'autosurveillance pour l'année 2008 – Station d'épuration de BOUC-BEL-AIR/Nouvelle*, ARPE, Bouc-Bel-Air, France, 14 p.
- CONSOGLOBE 2009, « Les impacts du réchauffement climatique en France », <http://www.consoglobe.com/ac-environnement-biodiversite_3717_impacts-rechauffement-climatique-france.html>, consulté le 09/09/2010.
- P. COUSINIE 2008, *Indicateurs de résultats en Agriculture Durable*, FNCIVAM, Formation « Mesures et indicateurs en agriculture durable », Paris, France, 6 p.
- P. DRECHSEL, M. GIORDANO et L. GYIELE 2004, *Valuing Nutrients in Soil and Water: Concepts and Techniques with Examples from IWMI Studies in the Developing World*, Rapport de recherche 82, International Water Management Institute, Colombo, Sri Lanka, 41 p.
- EAUFRANCE 2010, « Répartition de la consommation d'eau par secteur d'activités », <http://www.eaufrance.fr/spip.php?rubrique187&id_article=189>, consulté le 09/09/2010.
- D. ECOSSE 2001, *Techniques alternatives en vue de subvenir à la pénurie d'eau dans le monde*, Mém. D.E.S.S. « Qualité et Gestion de l'Eau », Fac. Sciences, Amiens, France, 62 p.
- C. D'HALLOY 2010, *L'irrigation est un enjeu stratégique pour la ferme France*, FDSEA 85, France, 1 p.
- FAO 2003, *Irrigation avec les eaux usées traitées – Manuel d'utilisation*, Le Caire, Egypte, 74 p.
- S. GAMRI 2010, *Analyse du phénomène de développement biologique dans les distributeurs de micro-irrigation avec les eaux chargées : Approche expérimentale*, Laboratoire LERMI, Cemagref, UMR G-Eau, Aix-en-Provence, France, 115 p.
- D. GAUVIN 2006, *Réutilisation d'effluents de stations de traitement d'eaux usées domestiques pour l'irrigation d'un terrain de golf*, Groupe scientifique sur l'eau, Direction risques biologiques, environnementaux et occupationnels, Institut national de santé public du Québec, Québec, 17 p.
- GENESE STATE UNIVERSITY OF NEW YORK (2010), « Qu'est-ce que la durabilité de l'environnement ? », <<http://www.geneseo.edu/sustainability/what-is/>>, consulté le 03/08/2010.
- P. GIRARDIN & al. 2005, *Indicateurs et tableaux de bord - Guide pour l'évaluation environnementale*, Paris, France, 39 p.
- G. GLEYSES, S. LOUBIER et J-P TERREAUX 2001, *Evaluation du coût des infrastructures d'irrigation*, Ingénieries n°27, Cemagref, UR Irrigation, Montpellier, France, pp. 3-11.
- M. HUARD, A. QUILY et B. SORNAY 2010, *Guide de réflexion autour de la conception d'un projet de réutilisation des eaux usées traitées en agriculture*, Cemagref, Dijon, France, 95 p.
- ICRA 2007, *Analyse Coûts-Bénéfices, Concepts-clés*, Ressources pédagogiques ICRA, Méthodes RAD, 6 p.
- C. KÖNIG 2006, *La route du sel : historique, géologie, alimentation*, Lausanne, Suisse, p. 11.
- D. LEBEGUE 2005, *Révision du taux d'actualisation des investissements publics*, Commissariat général du Plan, France, 112 p.

- J-B. LECLERCQ 2001, *Essais de matériel d'irrigation goutte-à-goutte et minidiffuseurs*, Chambre d'Agriculture du Vaucluse, France, 4 p.
- J-P. LEGROUX 2010, *Etat des initiatives en matière de réutilisation des eaux usées traitées*, ASTEE, Groupe réutilisation des eaux usées traitées, CGAAER, France, 5 p.
- LAROUSSE 2001, *Le petit Larousse illustré – Durabilité*, Paris, France, p. 352.
- G. MALAMAIRE 2010a, *Dossier technique spécifique à la zone de rejet intermédiaire de la station d'épuration de Bouc-Bel-Air*, ARPE, Assistance à l'exploitation des stations d'épuration, Bouc-Bel-Air (13), France, 7 p.
- G. MALAMAIRE 2010b, *Dossier technique spécifique à la zone de rejet intermédiaire de la station d'épuration de Fuveau*, ARPE, Assistance à l'exploitation des stations d'épuration, Fuveau (13), France, 7 p.
- S. MARLET 2004, *Evolution des systèmes d'irrigation et gestion de la salinité des terres irriguées*, Projet INCO-WADEMED, CIRAD-AMIS, Montpellier, France, 11 p.
- MEDITERRANEAN WASTEWATER REUSE WORKING GROUP, 2007, *Mediterranean Wastewater Reuse Report*, MED EUWI, 50 p.
- A. MERMOUD 2006, *Cours de physique du sol : Maitrise de la salinité des sols*, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse, 15 p.
- J-L. MILLO et J. VERDIER 1992, *Maintenance des périmètres irrigués*, Ministère de la coopération et du développement, 323 p.
- M. N'DIENOR 2006, *Fertilité et gestion de la fertilisation dans les systèmes maraichers périurbains des pays en développement : intérêts et limites de la valorisation agricole des déchets urbains dans ces systèmes, cas de l'agglomération d'Antananarivo (Madagascar)*, INA-PG, Paris, France, 242 p.
- OCDE 2001, *Indicateurs environnementaux pour l'agriculture – Méthodes et résultats*, Volume 3, Agriculture et Alimentation, 92 p.
- PNUD – FAO - OMS 1998, *Epuration et réutilisation des eaux usées à des fins agricoles*, Projet MOR 86/018, Ministère de l'agriculture du développement rural et des pêches maritimes, Administration du Génie Rural et Office Régionale de Mise en Valeur Agricole de Ourzazate, Maroc, 156 p.
- L. RIEUL et P. RUELLE 2003, *Guide pratique de l'irrigation*, 3^e édition, Cemagref, Paris, France, 344 p.
- H. TARDIEU 1999, *La valeur de l'eau en agriculture irriguée : une information économique nécessaire pour mieux réguler la gestion de l'eau et des productions agricoles dans un marché ouvert*, Grenade, Espagne, 19 p.
- R. THOMAS et S. MORINI 2005, *Gestion des sols salinisés par l'irrigation*, projet CISEAU, FAO, pp. 1-2.
- J-R. TIERCELIN 1998, *Traité d'irrigation*, Paris, France, p. 942.
- UNIFA 2005, *Principaux éléments fertilisants*, Parlons fertilisation, éd. 2005, 6 p.
- J-W. VAN HOORN 2001, *Cours de salinité de la formation D.S.P.U*, Centre International des Hautes Etudes Agronomiques en Méditerranée, IAM, Bari.
- D. XANTHOULIS 2002, *Optimisation de la réutilisation des eaux usées traitées en irrigation*, Unité d'hydraulique, Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques Gembloux, Tunisie, 74 p.

Annexes

Guide d'étude de la faisabilité technique et économique d'un projet de Réutilisation des Eaux Usées traitées (REUT) en irrigation agricole

Manon HUARD

01/11/2010

Réalisé sous la direction de Bruno MOLLE et de Jean-Pierre LEMIERE



Cemagref, UMR-GEAU
3 275 Route Cézanne
CS 40 061
13 182 AIX EN PROVENCE
Cedex 5
Tél. : 04 42 66 99 10



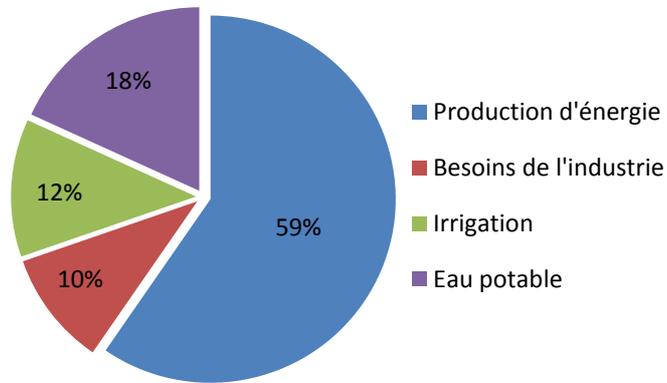
AGROSUP DIJON
26 Boulevard Petitjean
BP 87999
21 079 DIJON Cedex
Tél. : 03 80 77 25 25

Table des annexes

ANNEXE 1 : REPARTITION DES PRELEVEMENTS D'EAU PAR USAGE (EN 2007).....	4
ANNEXE 2 : REPARTITION DE LA PART CONSOMME PAR SECTEUR D'ACTIVITES.	4
ANNEXE 3 : REPARTITION DES ZONES DE REUTILISATION DES EAUX USEES TRAITEES (ZREUT) EN FRANCE.	5
ANNEXE 4 : CRITERES DE RISQUES EPIDEMIOLOGIQUES POUR L'HOMME.	6
ANNEXE 5 : CRITERES DE RISQUES EPIDEMIOLOGIQUES POUR LES ANIMAUX (RUMINANTS ET EQUIDES).....	7
ANNEXE 6 : VALEURS LIMITES DE QUALITE.	7
ANNEXE 7 : LES CONTRAINTES TECHNIQUES EN FONCTION DU NIVEAU DE QUALITE DE L'EAU.	8
ANNEXE 8 : LES CONTRAINTES DE DISTANCE EN FONCTION DU NIVEAU DE QUALITE DE L'EAU.	8
ANNEXE 9 : MATRICE SWOT DE L'ETUDE.....	9
ANNEXE 10 : DETERMINATION DES MISSIONS.....	9
ANNEXE 11 : PLANNING DE TRAVAIL.....	10
ANNEXE 12 : PRESENTATION DES IMPACTS POSITIFS ET NEGATIFS DE LA REUT A L'ECHELLE DES GESTIONNAIRES D'ESPACES VERTS.	11
ANNEXE 13 : PRESENTATION DES IMPACTS POSITIFS ET NEGATIFS DE LA REUT A L'ECHELLE DES COLLECTIVITES.	11
ANNEXE 14 : DEFINITION GENERALE DE LA VALEUR ECONOMIQUE DE L'ENVIRONNEMENT.	12
ANNEXE 15 : LES DIFFERENTS ASPECTS DE LA VALEUR ECONOMIQUE TOTALE (VET) DE L'ENVIRONNEMENT.	13
ANNEXE 16 : SCHEMATISATION DES INTERDEPENDANCES ENTRE LES DIFFERENTS EFFETS INDUITS PAR LA REUT.	14
ANNEXE 17 : REPARTITION DES SUBVENTIONS POUR LE FINANCEMENT DES PROJETS DE REUT DE CLERMONT-FERRAND ET DE MESNIL-EN-VALLEE.	15
ANNEXE 18 : SALINISATION ET GESTION DES SOLS.	16
ANNEXE 19 : SALINISATION ET GESTION DE L'EAU.	18
ANNEXE 20 : GESTION DE LA FERTILISATION AZOTEE.	18
ANNEXE 21 : GESTION DE LA FERTILISATION POTASSIQUE.	19
ANNEXE 22 : GESTION DE LA FERTILISATION PHOSPHATEE.....	19
ANNEXE 23 : GESTION DU MAGNESIUM.	19
ANNEXE 24 : TRAITEMENTS TERTIAIRES NECESSAIRES SELON LE NIVEAU DE QUALITE SOUHAITE.	20
ANNEXE 25 : CARACTERISTIQUES DES DIFFERENTS TRAITEMENTS TERTIAIRES.....	20
ANNEXE 26 : FICHE DE RENSEIGNEMENTS.....	21
ANNEXE 27 : FICHE DE CALCUL DES COUTS ET DES BENEFICES ECONOMIQUES DE LA REUT EN IRRIGATION AGRICOLE.	22
ANNEXE 28 : PROPOSITION D'UNE FICHE D'EVALUATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX DE LA REUT.	24
ANNEXE 29 : PROPOSITION D'UNE FICHE D'EVALUATION DES IMPACTS SOCIAUX DE LA REUT EN IRRIGATION AGRICOLE.	25
ANNEXE 30 : QU'EST-CE QUE L'IRRIGATION LOCALISEE ?.....	25
ANNEXE 31 : LES DIFFERENTS PROBLEMES TECHNIQUES DE L'IRRIGATION LOCALISEE.....	26
ANNEXE 32 : CARACTERISATION DES DEUX SITES D'ETUDE : FUVEAU ET BOUC-BEL-AIR.	27
ANNEXE 33 : SCHEMA GENERAL DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL MIS EN PLACE SUR LES SITES DE FUVEAU ET DE BOUC-BEL-AIR.	29
ANNEXE 34 : DESCRIPTIF TECHNIQUE DES DIFFERENTS GOUTTEURS UTILISES.	30
ANNEXE 35 : LES DIFFERENTS MODELES DE GOUTTEURS UTILISES POUR LES SITES DE FUVEAU ET DE BOUC-BEL-AIR.	30
ANNEXE 36 : CARACTERISTIQUES DES MATERIELS UTILISES SUR LES SITES DE FUVEAU ET DE BOUC-BEL-AIR.....	31
ANNEXE 37 : LA LOI DEBIT-PRESSION CARACTERISANT LES DIFFERENTS GOUTTEURS TESTES.	32
ANNEXE 38 : INVENTAIRE DES DIFFERENTS COMPOSANTS DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL.	34
ANNEXE 39 : PRESENTATION DES COEFFICIENTS D'UNIFORMITE DES DIFFERENTS GOUTTEURS TESTES SUR LES SITES DE FUVEAU ET DE BOUC-BEL-AIR.	35
ANNEXE 40 : PRESENTATION DES DEBITS MOYENS DE CHACUNE DES LIGNES TESTEES SUR LES SITES DE FUVEAU ET DE BOUC-BEL-AIR.	42
ANNEXE 41 : PRESENTATION DES DEBITS DES DIFFERENTS GOUTTEURS DE CHACUNE DES LIGNES TESTEES SUR LES SITES DE FUVEAU ET DE BOUC-BEL-AIR.	48
ANNEXE 42 : EVOLUTION DES DEBITS MOYENS EN FONCTION DE LA POSITION DU GOUTTEUR.	51
ANNEXE 43 : EVOLUTION DES PERTES DE CHARGES LE LONG DES DIFFERENTES LIGNES TESTEES.	57
ANNEXE 44 : EVOLUTION DE DES VARIATIONS DE PRESSION AU COURS DU TEMPS.	60
ANNEXE 45 : TABLEAU RECAPITULATIF DE CERTAINS RESULTATS OBTENUS SUR LE SITE DE FUVEAU.	61
ANNEXE 46 : TABLEAU RECAPITULATIF DE CERTAINS RESULTATS OBTENUS SUR LE SITE DE BOUC-BEL-AIR.	66
ANNEXE 47 : ANALYSE STATISTIQUE DU COMPORTEMENT DES DEBITS MOYENS.	71
ANNEXE 49 : CALCUL DE L'INCERTITUDE.....	78
ANNEXE 50 : CONDITIONS D'EXPERIMENTATION.	79
ANNEXE 51 : OUVERTURE DE GOUTTEURS ET OBSERVATION DU DEVELOPPEMENT OU NON D'UN BIOFILM.	80
ANNEXE 52 : PHOTOGRAPHIES DU FILTRE 130 MM AVANT ET APRES NETTOYAGE.	81
ANNEXE 53 : PHOTOGRAPHIES DU FILTRE 100 MM AVANT ET APRES NETTOYAGE.	82
ANNEXE 54 : PROLIFERATION DES ALGUES.	83

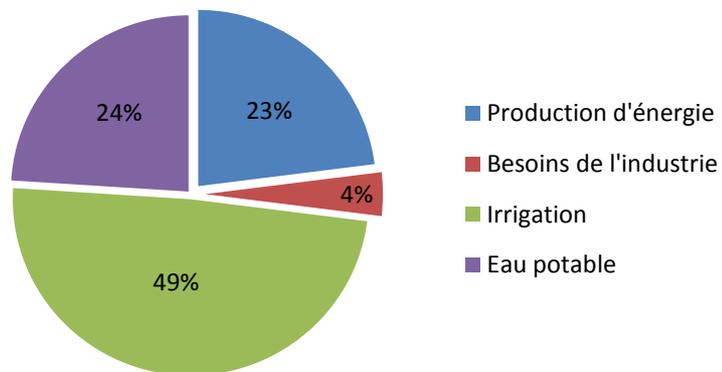
ANNEXE 55 : PHOTOGRAPHIES DU DISPOSITIF EXPERIMENTAL AVANT ET APRES LA POSE DES COLLECTEURS SOUS LES GOUTTEURS.....	84
ANNEXE 56 : RECYCLAGE DE SOLUTIONS DE DRAINAGE DES CULTURES FLORALES HORS-SOL.	85
ANNEXE 57 : ORGANIGRAMME GLOBAL DES OBJECTIFS ET CRITERES RETENUS.	87
ANNEXE 58 : GRILLE IDEA.	89
ANNEXE 59 : LISTE DES PROFESSIONNELS CONTACTES.	90
ANNEXE 60 : LISTE DES PERSONNES CONTACTEES AU SEIN DES CHAMBRES D'AGRICULTURE.	91
ANNEXE 61 : LISTE DES COMMUNES CONTACTEES.	92
ANNEXE 62 : LISTE DES REUTILISATEURS D'EAUX USEES TRAITEES CONTACTES.	92

Annexe 1 : Répartition des prélèvements d'eau par usage (en 2007).



Source : Elaboré à partir des données recueillies dans le document (EAUFRANCE, 2010).

Annexe 2 : Répartition de la part consommé par secteur d'activités.



Source : Elaboré à partir des données recueillies dans le document (EAUFRANCE, 2010).

Annexe 3 : Répartition des Zones de Réutilisation des Eaux Usées Traitées (ZREUT) en France.



Source : Elaborée à partir des enquêtes de HUARD, QUILY et SORNAY (2010) et des documents (BRISSAUD, 2006), (SEIRA, 2008) et (TEYSSANDIER, 2009).

Annexe 4 : Critères de risques épidémiologiques pour l'Homme.

Principaux pathogènes		Remarques		
Parasites		Amibiase	Cryptosporidium + Giardia = 6 %	
		Giardiase		
	Protozooses	Cryptosporidiose		
	Microsporidioses	Toxoplasmose		
	intestinales	Entérozoonoses		
		Encéphalitozoonoses		
	Helminthoses monoxènes	Ascaridiose	Expérimentation à partir de boues de STEP	Consommation légumes crus
		Trichocéphalose	Transmission par voie féco-orale	
		Anguilluloses	OM	
		Ankylostomoses	Transmission par voie transcutanée	
	Cestodoses (<i>téniasis, cysticercoses, échinococcoses</i>)	Expérimentation à partir de boues de STEP	Expérimentations à partir des eaux usées brutes	
	Toxocarose	<i>Toxocara sp</i>		
Bactéries	E. Coli enthéropathogènes		Conditions expérimentales ≠ Réalité	
	Bactéries non entériques	Pseudomonas		
		Aeromonas		
		Campylobacter		
		Legionella		
		Mycobacterium		
		Leptospira		
Virus	Calicivirus (<i>norovirus et sapovirus</i>)		Gastro-entérites + Hépatites virales	
	VHA			
	VHE			
	Entérovirus			
	Astrovirus			
	Paréchovirus			
	Adénovirus			
Rotavirus				
		Consommation légumes crus		
		Expérimentations à partir des eaux usées brutes		

Source : Tableau élaboré à partir de données tirées du document de l'AFSSA (2008)

Annexe 5 : Critères de risques épidémiologiques pour les animaux (ruminants et équidés).

Principaux pathogènes		Origines EU
Parasites	Tænia spp.	Urbaine
	Toxoplasma gondii	
	Cryptosporidium spp.	Urbaine + IAA
	Œufs ou larves de nématodes (<i>Strongyloïdes spp.</i>)	IAA
	Œufs ou larves de trématodes (<i>Dicrocoelium spp.</i>)	
Bactéries	Salmonella spp.	Urbaine + IAA
	E. Coli O157:H7	
	Yersinia enterocolitica	
	Listeria monocytogenes	
	Clostridium perfringens	IAA
	Mycobacterium avium subspecies paratuberculosis	
	Campylobacter spp. (<i>jeunes bovins</i>)	
Rhodococcus equi (<i>jeunes équins</i>)		
Virus	Coronavirus	IAA Etablissement d'équarrissage + Abattoir
	Rotavirus	
	Norovirus	
	Pestivirus	

Source : Tableau élaboré à partir de données tirées du document (AFSSA, 2008).

Annexe 6 : Valeurs limites de qualité.

Paramètres	Niveaux de qualité			
	A	B	C	D
MES (mg/L)	< 15	Conforme à la réglementation des rejets d'EUT pour l'exutoire de la STEP hors période d'irrigation		
DCO (mg/L)	< 60			
E. Coli (UFC/100 mL)	≤ 250	≤ 10 000	≤ 100 000	-
Entérocoques fécaux (abattement en log)	≥ 4	≥ 3	≥ 2	≥ 2
Phages ARN-F spécifiques (abattement en log)	≥ 4	3	≥ 2	≥ 2
Spoires de bactéries anaérobies sulfitoréductrices (abattement en log)	≥ 4	≥ 3	≥ 2	≥ 2

Source : (LEGIFRANCE, 2010).

Annexe 7 : Les contraintes techniques en fonction du niveau de qualité de l'eau.

Organe d'arrosage		Angle d'attaque du jet	Caractéristiques du matériel
Bubbler sur matériel déplaçable		-	Appareils à utiliser sur rampe pivotante en y adaptant des cannes de descente
Buses (180°, 360° et rotatives) sur matériels déplaçables (rampe tractée, pivotante ou frontale)		Pour les buses de 360° : utiliser un déflecteur conique convexe	A installer de préférence en position sur canne de descente, dans le cas de rampe pivotante ou frontale à une hauteur compatible avec la culture en place
Asperseur	Petit asperseur	Utiliser de préférence des asperseurs à angle bas (12°) pour éviter une trop forte prise au vent	Utiliser à poste fixe ou sur matériel mobile
	Canon d'arrosage	Utiliser de préférence des canons à angle bas (15-18°) pour éviter une trop forte prise au vent	Pour la rotation le canon à retour lent au canon à retour rapide

Source : (AFSSA, 2008).

Annexe 8 : Les contraintes de distance en fonction du niveau de qualité de l'eau.

Nature des activités à protéger	Niveaux de qualité		
	A	B	C et D
Plan d'eau (1)	20 m	50 m	100 m
Bassin aquacole (à l'exception des coquillages filtreurs) Pisciculture (y compris pêche de loisir)	20 m	50 m	100 m
Conchyculture Pêche à pied des coquillages filtreurs	50 m	200 m	300 m
Baignades et activités nautiques	50 m	100 m	200 m
Abreuvement du bétail	50 m	100 m	

(1) A l'exception du plan d'eau servant d'exutoire au rejet de la STEP et des plans d'eau privés où l'accès est réglementé, et où aucune activité telle que la baignade, sport nautique, pêche ou abreuvement du bétail n'est pratiquée.

Source : (LEGIFRANCE, 2010).

Annexe 9 : Matrice SWOT de l'étude.

<p style="text-align: center;"><u>Atouts / Forces</u></p> <p style="text-align: center;"><u>Général</u></p> <p>Contexte naturel</p> <p>Mentalités</p> <p>Activité en expansion (<i>multiplicité acteurs</i>)</p> <p>Demande de références (<i>constructeurs</i>)</p> <p>Cemagref : Image + Réseau professionnel</p> <p style="text-align: center;"><u>Partie technique</u></p> <p>Cemagref : Equipements</p> <p>Partenariat avec JDW, Jain, Netafim</p> <p>Tests aspersion déjà réalisés + W en cours</p> <p>Existence de protocoles normalisés</p> <p style="text-align: center;"><u>Partie économique</u></p> <p>CSP : Biblio + Contacts</p> <p>Appui de Sylvie Morardet</p>	<p style="text-align: center;"><u>Contraintes / Lacunes</u></p> <p style="text-align: center;"><u>Général</u></p> <p>Durée du stage</p> <p>Législation en cours d'élaboration</p> <p style="text-align: center;"><u>Partie technique</u></p> <p>Dépendance de la météo</p> <p style="text-align: center;"><u>Partie économique</u></p> <p>Absence de références</p> <p>Rareté des projets existants + sans analyse économique stricte</p> <p>Diversité des projets</p> <p>Nécessité d'actualiser les données</p> <p>Bénéfices non-économiques difficilement évaluables</p>
<p style="text-align: center;"><u>Opportunités</u></p> <p>Mesures politiques relatives à l'agriculture et l'irrigation</p> <p>Intérêt des constructeurs pour le rapport technologie/économie</p> <p>Environnement (UE) : Evolution → Ville durable</p> <p>Marché à créer</p>	<p style="text-align: center;"><u>Menaces / Risques</u></p> <p>Bénéfices économiques non-quantifiables / non-avérés</p> <p>Inaccessibilité aux données</p> <p>Résultats d'essais peu concluants / non-interprétables / pas généralisables</p> <p>Incitation à la consommation des aménageurs et des professionnels de l'épuration</p>

SWOT

Annexe 10 : Détermination des missions.

Estimer les enjeux financiers directs et indirects

- Identification de l'ensemble des effets de la REUT selon l'échelle considérée
- Elaboration des questionnaires et de leurs grilles de lecture
- Réalisation d'enquêtes semi-directives (*constructeurs, STEP, agriculteurs, collectivités*)
- Détermination d'indicateurs et de fourchettes de coûts

Créer des références techniques en termes de matériels d'irrigation

- Elaboration de protocoles (*liste des hypothèses à tester*)
- Réalisation d'essais sur du matériel de micro-irrigation
- Analyse des résultats

Proposer une méthode d'évaluation de la durabilité des projets de REUT

- Littérature : Aspects liés à la durabilité
- Répertoire des différents scénarii de REUT possibles (*éléments différents d'un projet à l'autre*)
- Interprétation technico-économique des résultats des essais

Annexe 11 : Planning de travail.

	Juin			Juillet				Août					Septembre					Octobre					Novembre		
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18	S19	S20	S21	S22	S23		
Découverte de l'entreprise	■																								
Recherche bibliographique	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■										
Préparation des essais	■	■	■	■	■	■	■																		
Préparation des enquêtes	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
Essais (<i>matériel de micro-irrigation</i>)								■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■		
Analyse et interprétation des essais																					■	■	■		
Listing et explication des effets directs et indirects																									
Enquêtes (<i>acteurs de la REUT</i>)																									
Elaboration d'indicateurs de durabilité																									
Rédaction du mémoire																						■	■		
Préparation de la soutenance																							■		
Soutenance																							■		

Annexe 12 : Présentation des impacts positifs et négatifs de la REUT à l'échelle des gestionnaires d'espaces verts.

	Impacts environnementaux	Impacts agronomiques	Impacts socio-économiques
-	Accumulation de polluants, ETM, pathogènes, etc. dans le sol Augmentation de la salinité du sol	Diminution du potentiel du sol + contamination Surveillance sol Réhabilitation du sol	Coûts supplémentaires
			Nécessité d'embaucher un employé supplémentaire ?
	Adaptation technique (<i>stockage, SI, réseau de distribution, maintenance,...</i>)		
+	Apports nutriments au sol	Diminution des intrants Augmentation du potentiel sol	Diminution coûts intrants Augmentation de la production d'herbe donc des tontes
	Fiabilité de la ressource en eau Réduction des risques	Garantie de qualité	Développement du tourisme Baisse du coût de l'eau conventionnelle
	Valorisation des déchets		Valorisation de leur image de marque

Annexe 13 : Présentation des impacts positifs et négatifs de la REUT à l'échelle des collectivités.

	Impacts environnementaux	Impacts socio-économiques
-	Accumulation de polluants, ETM, pathogènes, etc. dans le sol	Réhabilitation des sols Contrôle de la qualité eaux + sol
	Augmentation de la salinité du sol	Subventions des projets Nécessité d'embaucher un employé supplémentaire
		Suppression revenu « eaux conventionnelles »
+	Diminution de la pollution du milieu récepteur	Réhabilitation usages/jouissances <i>(due au détournement des effluents)</i>
	Création de ceinture verte autour des villes	Développement du tourisme Création d'emplois
	Valorisation des déchets	Valorisation de leur image de marque
	Diminution de la pression sur la ressource en eau conventionnelle	Suppression coût de l'eau conventionnelle
	Combinaison possible avec la REUT urbaine (<i>voierie, réseau sanitaire, bouche d'incendie, etc.</i>) + Recharge nappe ??	

Annexe 14 : Définition générale de la valeur économique de l'environnement

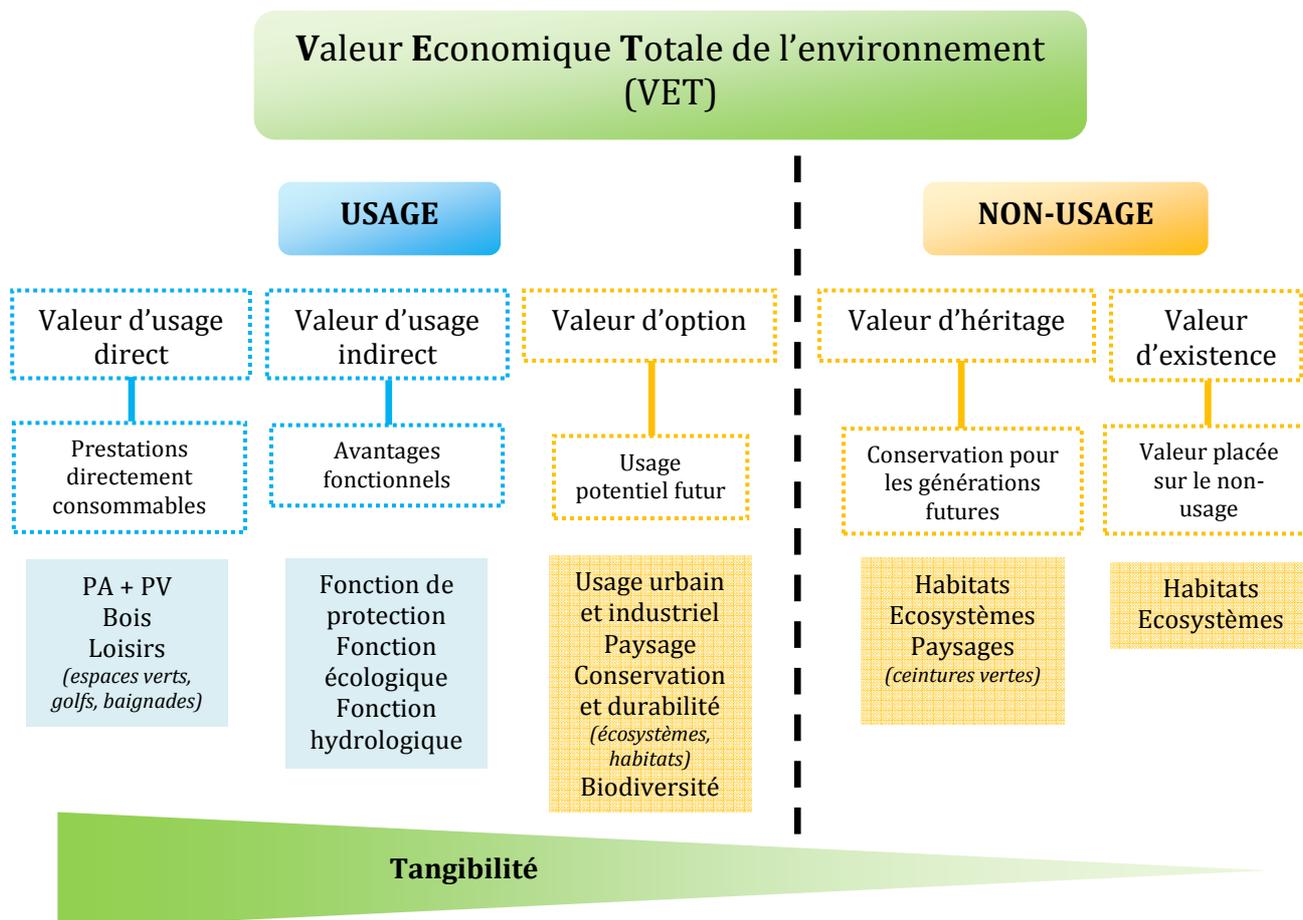
L'objectif est, « à travers la saisie de la valeur de l'environnement dans une unité monétaire, de la comparer avec les valeurs économiques standards (revenu, valeur ajoutée) et ainsi d'arbitrer les décisions nécessaires à la gestion de l'interface entre l'économie et l'environnement ». (ICRA, 2007)

Attribuer une valeur économique, ou monétaire, à l'environnement constitue une entreprise difficile et controversée. L'une des premières critiques que l'on peut formuler repose sur la distinction entre la valeur instrumentale et la valeur intrinsèque de l'environnement. La valeur instrumentale correspond à la valeur que l'environnement possède en tant que moyen nécessaire à la poursuite d'autres fins. Par exemple la capacité auto-épuratrice d'un milieu naturel qui prend la place d'une station plus grande ou plus performante. A l'inverse, la valeur intrinsèque constitue la valeur de l'environnement considéré comme une fin en soi sans prendre en compte son utilité à l'égard d'autres fins. Exemple la satisfaction de vivre dans une zone "protégée" ou "naturelle". Cette dernière demeure subjective et va dépendre donc de l'observateur. Il est donc aisé de la confondre avec « une valeur projetée par l'homme ».

En économie de l'environnement, l'environnement est considéré comme possédant une valeur instrumentale pour l'homme. Toute dégradation de la qualité de l'environnement est ainsi « mauvaise » pour l'homme et protéger l'environnement ne se justifie que dans l'amélioration de l'existence et du bien-être de l'homme.

Annexe 15 : Les différents aspects de la Valeur Economique Totale (VET) de l'environnement.

La valeur économique de l'environnement présente des aspects multiples. La notion de valeur économique totale (VET) de l'environnement permet de spécifier ces divers aspects en distinguant valeurs d'usage, d'option, de non-usage, de même, en différenciant usages présents et usages futurs.



Schématisation de la valeur économique totale.

Source : Schéma élaboré à partir des données recueillies dans le document (GROOT, STUIP, FINLAYSON et DAVIDSON, 2006).

La **valeur d'usage** de l'environnement désigne à la fois « les prestations directement consommables » (valeur d'usage direct: nourriture, bois, biomasse, externalités, etc.) que l'environnement met à disposition de l'homme et celles indirectement utilisées telles que les fonctions de protection, de régulation, d'assimilation que l'environnement remplit (valeur d'usage indirect).

La **valeur d'option** représente la valeur attribuée à un usage potentiel futur.

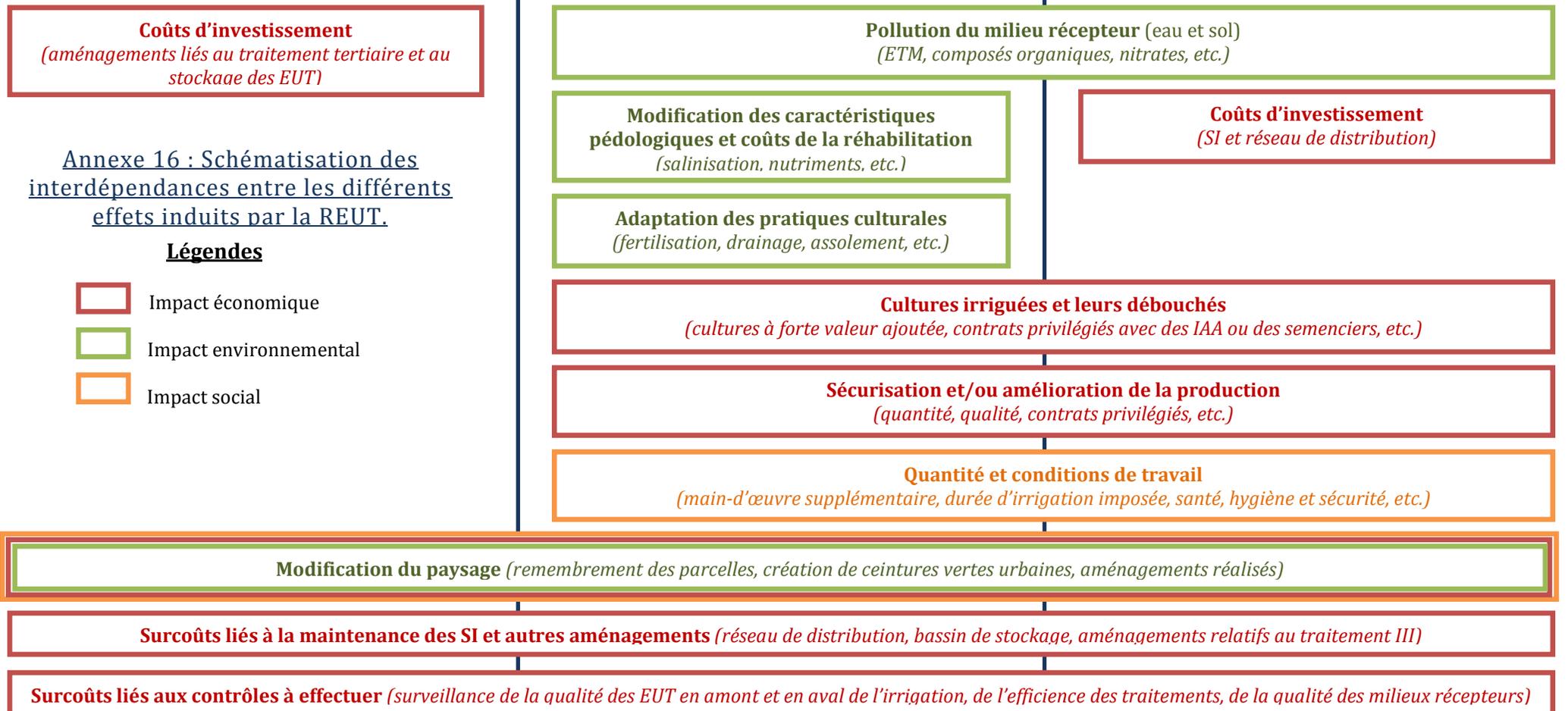
Les **valeurs de non-usage** de l'environnement peuvent être différenciées en **valeur de legs** (ou d'héritage) et **valeur d'existence**. La première correspond à la valeur accordée à des caractéristiques environnementales conservées pour les générations futures (qui en feront ou non usage). Enfin, la valeur d'existence est celle placée sur l'existence même d'une composante de l'environnement (indépendamment de tout usage).

La **tangibilité** de ces valeurs diminue à mesure que l'on se déplace vers l'usage futur et le non-usage.

Va dépendre de ...



Va agir sur ...

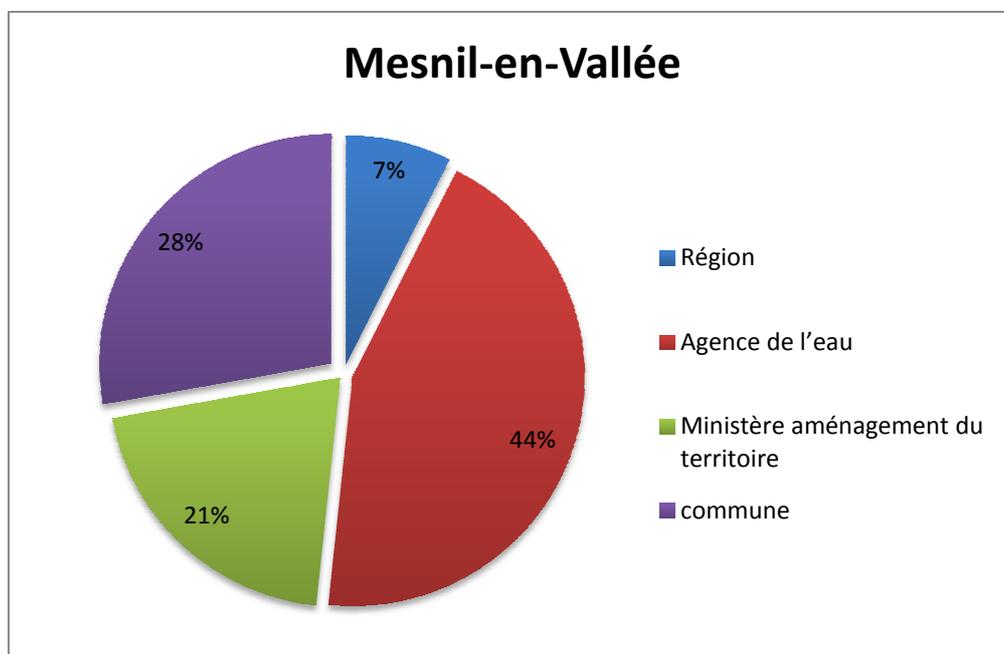
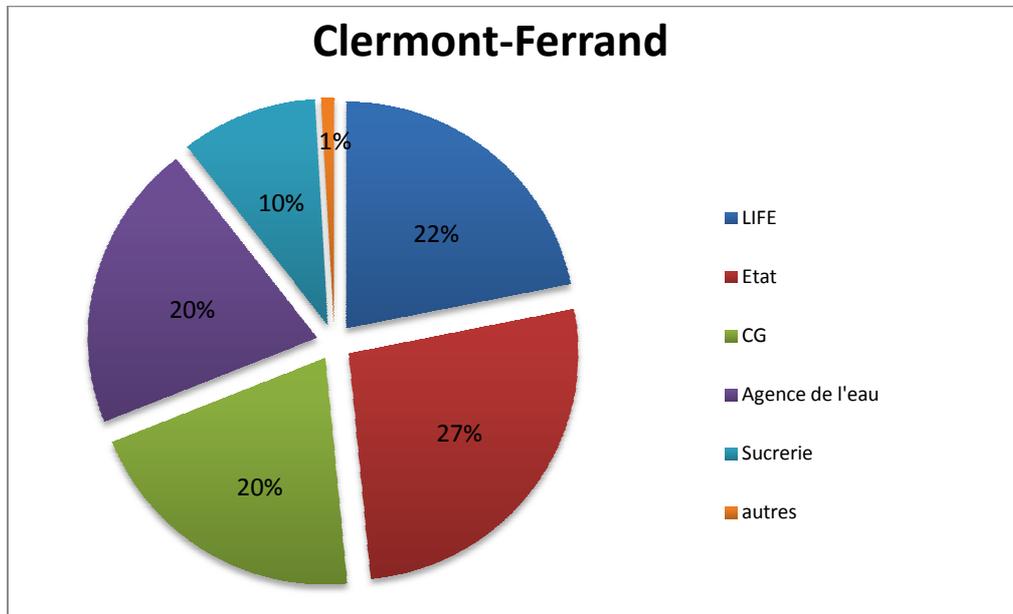


Annexe 16 : Schématisation des interdépendances entre les différents effets induits par la REUT.

Légendes

- Impact économique
- Impact environnemental
- Impact social

Annexe 17 : Répartition des subventions pour le financement des projets de REUT de Clermont-Ferrand et de Mesnil-en-Vallée.



Annexe 18 : Salinisation et gestion des sols.

Les terres salines sont sensibles et réagissent différemment aux diverses pratiques d'aménagement. Le choix de méthodes culturales visant la restauration des sols salinisés dépend de la gravité de la salinisation, de son étendue et des caractéristiques locales. Il faut généralement privilégier une approche biologique, en faisant appel à des régimes particuliers d'assolement et de travail du sol.

Une bonne gestion du sol va se traduire par :

- ◆ Le maintien de niveaux satisfaisants de la fertilité, du pH et de la structure des sols pour favoriser la croissance des cultures à haut rendement.
- ◆ L'optimisation de la couverture de la surface du sol.
- ◆ Le paillage de la terre afin de conserver l'humidité du sol et de réduire l'érosion.
- ◆ Le choix des cultures appropriées (ex : utilisation de plantes aux racines profondes pour maximiser l'extraction de l'eau).
- ◆ La rotation des cultures, le labour minimum et la jachère minimale.

Dans une exploitation irriguée confrontée au problème croissant de salinité, une solution peut consister à utiliser des cultures qui présentent une forte tolérance au sel.

	Tolérance à la salinité		
	Faible <i>[0 ; 4] dS.m⁻¹</i>	Moyenne <i>]4 ; 8] dS.m⁻¹</i>	Elevée <i>]8 ; 12] dS.m⁻¹</i>
Cultures maraichères	Brocolis Haricots Laitues Navets Oignons Petits pois Poivre Pommes de Terre Radis	Ail Artichaut Aubergine Carottes Céleris Choux Concombres Potiron Tomates	Asperges Courgettes Epinards
Fourrages	Betterave sucrière Trèfle	Alfalfa Avoine Blé Fétuque Maïs Soja Sorgho Tournesol	Agropyre Luzerne Orge Seigle
Fruits	Abricots Agrumes Amandes Avocats Citrons Fraises Mûres Oranges Pêches Poirs Pommes Prunes Raisins	Figues Goyaves Grenades Melons	Dattes Olives

Tolérance relative de certaines cultures à la salinité du sol.

Source : Elaboré à partir des documents (TIERCELIN, 1998), (BRADY, 2002) et (BOLAND, FAGGIAN, JARWAL, STEVENS, 2006).

En règle générale, à salinité égale, une plante supporte mieux la salure quand elle pousse dans un sol sableux que dans un sol argileux, et mieux dans un sol aéré que dans un sol gorgé d'eau. (TIERCELIN, 1998)

Il est possible de limiter l'infiltration de l'eau dans le sol en dérivant l'eau de surface vers des étangs situés au bas des pentes. Les cultures fourragères et les plantes vivaces, telles que la luzerne. En effet, comparées aux plantes annuelles, ces cultures présentent une saison de croissance plus longue, une capacité d'absorption plus grande en termes de quantité et de profondeur. Ainsi, les cultures fourragères empêchent-elles l'accumulation d'eau souterraine et ainsi la salinisation du sol.

En ensemençant le sol avec des cultures tolérantes au sel dans les terrains où la gravité de la salinisation est raisonnable, il est possible de réduire la mise en jachère par la culture continue ou par l'établissement d'une couverture végétale permanente et de cultures tolérantes au sel. Réduire le travail profond du sol par l'adoption de non-labour. Planter des cultures fourragères ou des arbres près des plans d'eau pour favoriser l'absorption de l'eau du sol. Retourner au sol le fumier et les résidus de culture : un sol riche en matière organique pourra retenir davantage d'eau. Prévenir la formation de flaques au printemps. Installer des réseaux de drainage artificiels en certains endroits si nécessaire. Eliminer les infiltrations d'eau dues aux canaux d'irrigation, aux mares artificielles et aux étangs. Inciter les agriculteurs à établir un couvert végétal permanent sur leurs terres marginales ou à transformer ces dernières en habitats pour la faune.

Certains sols salins-sodiques et sodiques peuvent être remis en valeur par l'apport de gypse (CaSO₄) suivi par un lessivage du sodium. A l'extrême, si le champ est très fortement salinisé, il est parfois plus avantageux de retirer la parcelle de la production. (BRADY, 2002)

Le lessivage est une technique qui consiste à dissoudre les sels accumulés dans le sol par des apports d'eau importants et à les entraîner en-dessous de la zone racinaire par le mouvement descendant de l'eau. (MERMOUD, 2006)

Afin de connaître les besoins en lessivage à apporter, il est nécessaire de calculer la variation de la masse de sel dans le sol (ΔMs).

Apports - Pertes = ΔMs	
<u>Apports</u>	<u>Pertes</u>
Apports par précipitations Pe Cp	Pertes par percolation D Cd
Apports par irrigation Ir Ci	Prélèvements par les végétaux Mv
Apports par remontées capillaires G Cg	Adsorption ou précipitation Mp
Apports par dissolution Md	
Apports par l'agriculture Ma	
<u>Hypothèses fréquentes</u>	
$Cp \approx 0$ $Md \approx 0$; $Ma \approx 0$; $Mv \approx 0$; $Mp \approx 0$.	
→ Equation approchée du bilan de salinité : $\Delta Ms = Ir Ci + G Cg - D Cd$.	

Pour éviter une accumulation de sel dans les sols, on doit avoir : $\Delta Ms = 0 \leftrightarrow Ir Ci = D Cd - G Cg$. Dans le cas où la nappe phréatique est profonde, on obtient : $Ir Ci = D Cd$. Donc pour éviter une accumulation des sels dans le sol, il faut que la quantité de sels apportés par l'irrigation, et donc par les eaux usées traitées réutilisées, soit égale à la quantité de sels emportés par le drainage.

Ainsi le besoin en eau de lessivage (noté LR pour Leaching Requirement) est défini par la formule suivante :

$$LR = \frac{\text{Drainage sous la zone racinaire}}{\text{Apports par irrigation (besoin des végétaux + lessivage)}} = \frac{D}{Ir} = \frac{Ci}{Cs} = \frac{CE_i}{CE_s}$$

Avec :

Ci et CE_i : Concentration et conductivité électrique (CE) de l'eau d'irrigation.

Cs et Ces : Valeur maximale de la concentration et de la conductivité électrique des eaux de drainage, de sorte que l'effet sur les cultures reste limité.

Source : (MERMOUD, 2006).

Annexe 19 : Salinisation et gestion de l'eau.

Les solutions mécaniques, telles que l'aménagement de réseaux de drainage souterrains, sont très coûteuses et doivent ainsi être réservées aux terrains les plus touchés.

Une bonne gestion de l'eau va elle se traduire par :

- ◆ L'irrigation efficace des cultures, le contrôle de l'humidité du sol et la détermination exacte des besoins en eau.
- ◆ Le drainage approprié selon la situation :
 - Drainage de surface pour collecter et maîtriser l'eau qui entre et/ou sort du périmètre d'irrigation ;
 - Drainage souterrains pour contrôler le niveau de la nappe phréatique sous la zone racinaire ;
 - Bio-drainage par l'utilisation de la végétation pour absorber les eaux en excès dans les sols.
- ◆ La maîtrise des rejets des eaux de drainage pour éviter la contamination des sols et des eaux récepteurs et l'environnement.

Annexe 20 : Gestion de la fertilisation azotée.

Afin d'être utilisable par les plantes, l'azote (minérale ou organique) doit être transformé en nitrates par les bactéries présentes dans le sol (étape de minéralisation). Ainsi, l'essentiel de la nutrition azotée des plantes est assurée par les nitrates. L'azote, sous forme d'ions nitrate, est très soluble et donc peu retenu par le sol. Apporté en trop grande quantité, l'excédent est lessivé vers la nappe phréatique.

Apporté en excès les nitrates peuvent s'accumuler dans les plantes et devenir ainsi néfaste pour la santé humaine et animale.

C'est pourquoi, afin de conserver à la culture toute sa qualité et d'éviter toute pollution des eaux souterraines, il est essentiel de s'assurer que l'apport total d'azote biodisponible provenant notamment d'engrais, de fumier et de déchets n'excède jamais les besoins de la culture.

La gestion de la fertilisation (quelque soit l'élément nutritif considéré) va dépendre du type de plante cultivée et de ses besoins en cet élément.

Cultures	Besoin en azote par quintal de grain récolté
Blé tendre d'hiver	3,0 kg/q
Orge d'hiver	2,4 kg/q
Blé tendre de printemps	3,0 kg/q
Orge	2,2 kg/q
Blé dur	3,5 kg/q
Colza	6,5 kg/q
Maïs grain	2,3 kg/q
Tournesol	4,5 kg/q

Besoin des plantes en azote.

Source : (UNIFA, 2005).

Annexe 21 : Gestion de la fertilisation potassique.

Exigence élevée	Exigence moyenne	Exigence faible
Betterave Pomme de terre Cultures légumières	Colza Luzerne Maïs ensilage Maïs grain Pois Tournesol Soja	Avoine Blé tendre Blé dur Orge Sorgho

Exigence des plantes en potasse (K₂O).

Source : (UNIFA, 2005).

La fertilisation potassique va également dépendre des caractéristiques pédologiques de la parcelle considérée. Ainsi, certains sols argileux sont naturellement riches en potassium et ne nécessitent donc aucun engrais potassique. Il est en revanche impossible de déterminer exactement les besoins d'une culture en potassium sans une analyse du sol.

Annexe 22 : Gestion de la fertilisation phosphatée.

Exigence élevée	Exigence moyenne	Exigence faible
Betterave Colza Luzerne Pomme de Terre Culture légumières	Blé dur Maïs ensilage Orge Pois Sorgho	Avoine Blé tendre Maïs grain Seigle Soja Tournesol

Exigence des plantes en phosphore (P₂O₅).

Source : (UNIFA, 2005).

L'apport de phosphore (sous forme d'engrais, de compost, de fumier, de biosolides d'épuration, de déchets, etc.) pourrait réduire les rendements ou la qualité de la récolte. Ainsi, des apports de phosphore peuvent entraîner des carences en zinc dans les sols pauvres en zinc et augmenter les risques de pollution de l'eau.

Annexe 23 : Gestion du magnésium.

Le magnésium est particulièrement important pour les cultures fruitières. Par exemple, pour les pommiers, une carence en magnésium peut causer une chute prématurée des fruits.

Bien que très rares, les sols dont la teneur en magnésium est inférieure à 20, ont besoin d'un apport de magnésium pour supporter la plupart des cultures. Lorsque le pH du sol est inférieur à 6, l'application de chaux dolomitique constitue le moyen le plus efficace et le plus économique de corriger une carence en magnésium (autres techniques très coûteuses).

Puisque le potassium et le magnésium se font concurrence directe au niveau de l'absorption par les plantes, l'application de potasse peut entraîner une carence en magnésium ou aggraver une carence existante. On doit donc vérifier la teneur du sol en potassium et éviter les épandages excessifs de potasse sur les sols pauvres en magnésium.

Annexe 24 : Traitements tertiaires nécessaires selon le niveau de qualité souhaité.

A	B	C et D
Traitement extensifs et procédés de désinfection spécifique nécessaires	Traitement extensifs nécessaires Procédés de désinfection spécifique facultatifs	Traitement conventionnel primaire et secondaire de station classique
Ozonation, traitement UV, microfiltration, ultrafiltration, chloration, lagunage	Ozonation, traitement UV, microfiltration, ultrafiltration, chloration, lagunage	Lagunage

Source : (HUARD, QUILY et SORNAY, 2010).

Annexe 25 : Caractéristiques des différents traitements tertiaires.

	Ozonation	Traitement UV	Microfiltration Ultrafiltration	Chloration	Lagunage
Efficacité	Excellente	Bonne	Bonne	Excellente	Bonne
Avantages	Rapidité	Rapidité	Aménagements nécessitant peu de surface	Rapidité Forte rémanence	Faible coût
Contraintes	Faible rémanence (nécessite une utilisation rapide des EUT ou un stockage en lagune) Coût élevé	Faible taux de MES Coût moyen	Sensible au colmatage Coût élevé	Faible taux de MES Coût moyen	Nécessité d'une grande surface pour l'aménagement des bassins Coût élevé à la mise en route puis faible en fonctionnement

Source : (HUARD, QUILY et SORNAY, 2010).

Annexe 26 : Fiche de renseignements.

Contexte géographique	Topographie de l'espace		
	Répartition des parcelles	Type de parcellaire	
		Distance par rapport aux zones de restrictions	
	Distance par rapport aux aménagements épuratoires		
Aménagements existants			

Station d'épuration	Taille et capacité	
	Besoins du milieu récepteur originel	
	Origine des eaux	
	Aménagements possibles	
	Niveau de qualité souhaité	
	Traitement tertiaire sélectionné	

Aménagements nécessaires		
Traitement tertiaire		
Stockage	Volume	
	Période	
	Localisation	
	Adduction de l'eau	
Réseau d'adduction	Distance parcelle/STEP	
	Topographie du site	

Culture	Culture irriguée	
	Besoins en eau	
	Période d'irrigation souhaité	
	Période d'irrigation imposée	
	Restrictions	
	Surface	

SI	Type d'irrigation	
	Âge du matériel	

Annexe 27 : Fiche de calcul des coûts et des bénéfices économiques de la REUT en irrigation agricole.

Coûts économiques		
Coût de l'étude préalable	A l'unité	800 à 1000 €
	Sur 6 mois	4800 à 6000 €
Coûts d'une analyse microbiologique du sol	Métaux lourds	49,50 €
	HAP	45 €
	PCB	59,50 €
	Phtalates	110 €
	Total pour une analyse	264,00 €
	Total pour un sol homogène	264,00 €
	Total pour un sol hétérogène	264 x nb de types de sol identifiés
Coût d'investissement lié au système épuratoire	Traitement UV	
	Ozonation	
	Chloration	
	Microfiltration	
	Ultrafiltration (UF)	
	Nanofiltration (NF)	
	Osmose inverse (OI)	
Frais de fonctionnement des aménagements tertiaires	Traitement UV	0,02 €/m ³
	Ozonation	-
	Chloration	0,43 €/m ³ + 4 €/kg de Cl
	Microfiltration	[0,5 ; 1,16] €/m ³
	Ultrafiltration (UF)	1,13 €/m ³
	Nanofiltration (NF)	[0,10 ; 0,21] €/m ³ (hors main-d'œuvre)
	Osmose inverse (OI)	[0,45 ; 10] €/m ³
Maintenance des aménagements liés au traitement tertiaire	Lagunage	0,07 €/m ³ (Cf. ASA Limagne Noire)
	Traitement UV	
	Ozonation	
	Chloration	
	Microfiltration	
	Ultrafiltration (UF)	
	Nanofiltration (NF)	
Osmose inverse (OI)		
Lagunage		

Coût du contrôle de l'efficacité du traitement	A l'unité		800 à 1000 €/u
	Traitement UV		3000 à 5000 €/an
	Ozonation		
	Chloration		
	Microfiltration		
	Ultrafiltration (UF)		
	Nanofiltration (NF)		
	Osmose inverse (OI)		
Lagunage		800 à 1000 €/an	
Coût de mise en place et de maintenance du réseau de distribution	Tranchée main	Terrain normal	40 €/ml
		Présence d'eau	20 €/ml
	Remblai		20 €/ml
	Traversée de rivière		10 000 € (prix unitaire si > 5 m)
	Passage sous route départementale		10 000 €
	Passage sous voie ferrée		25 000 €
	PVC irrigation 16 bars (140-400 mm)		22 - 68 €/ml
	Maintenance		
Coûts liés au SI	Coûts d'installation du chantier et coûts annexes		200 000 €
	Frais de fonctionnement	Gestion courante	
		Energie	
		Personnel	
		Transferts (impôts, taxes, etc.)	
		Coût moyen d'exploitation	(cf. formule de LOUBIER)
	Estimation de la valeur actuelle des équipements		
Coûts de maintenance	Aspersion		
	Microirrigation		

Bénéfices économiques				
Culture	Production	Rendement	Avant la REUT	
			Après la REUT	
		Qualité	Avant la REUT	
			Après la REUT	
	Frais de fonctionnement	Consommation en intrants	Avant la REUT	
			Après la REUT	
Consommation en eau conv.		Avant la REUT		
		Après la REUT		
Subventions	Agences de l'eau			
	Conseils généraux et régionaux			
	Europe			

Annexe 28 : Proposition d'une fiche d'évaluation des impacts environnementaux de la REUT.

Salinisation	Gestion du sol	Couverture du sol	Semences	
			Production	
			Frais annexes	(énergie, md, usure du matériel)
		Paillage		
		Pratiques culturales	Labour minimum	
	Gestion de l'eau	Drainage	Drainage de surface	
			Drainage souterrain	
			Bio-drainage	
		Réhabilitation du sol		
		Lessivage		

Diminution de la pression sur la ressource en eau	Prix de l'eau conventionnelle		0,001 à 2 €/m3
	Volume d'eau conventionnelle utilisé pour l'irrigation des cultures	Avant la REUT	
		Après la REUT	
		Différence	

Fertilité du sol			
Nutriments	[nutriments] _{EUT}	Prix unitaire (€/kg)	Prix (€/ha)
N	16 à 62 kg/ha		
P	2 à 69 kg/ha		
K	4 à 24 kg/ha		
Mg	18 à 208 kg/ha		
Ca	9 à 100 kg/ha		
Na	27 à 182 kg/ha		

Modification de la pollution physico-chimique du milieu récepteur originel			
Milieu récepteur originel	Comparaison de la composition physico-chimique des eaux		
	ETM	Composés organiques	Molécules médicamenteuses
Milieu récepteur agricole			

Contamination bactériologique et pollution physico-chimique du sol et des eaux		
Suivi en fonctionnement du sol	1 analyse /5 ans	264 €/analyse/type de sol
Suivi des ressources en eaux	fréquence	coûts
Suivi des cultures	fréquence	coûts

Annexe 29 : Proposition d'une fiche d'évaluation des impacts sociaux de la REUT en irrigation agricole.

Création d'emplois	Nb UTH	Avant REUT	
		Après REUT	
Acceptabilité sociale	Campagne de communication auprès des populations		
	Evènements organisés en vue de promouvoir l'activité de REUT		
	Débouchés des cultures	Contrats privilégiés	
		Ventes directes	
Développement du tourisme	Réhabilitation de zone de baignade		
	Réhabilitation de zone de pêche		
	Arrosage de zones touristiques (<i>golfs, espaces verts</i>)		
	Création de ceintures vertes urbaines	Marchés, AMAP, etc.	
		Superficie	

Annexe 30 : Qu'est-ce que l'irrigation localisée ?

Différents termes sont utilisés pour désigner ce mode d'irrigation. Ainsi, la CIID parle de micro-irrigation, d'autres auteurs de goutte-à-goutte, tandis que la FAO parle d'irrigation localisée (TIERCELIN, 1998). Nous emploierons ce dernier terme par la suite.

Les systèmes d'irrigation localisée sont généralement utilisés en arboriculture et pour les cultures maraichères, principalement en raison des possibilités qu'ils offrent en matière d'économie d'eau, de leur coût et de leur précision. (TIERCELIN, 1998)

L'ensemble des avantages et inconvénients spécifiques de l'irrigation localisée sont recensés dans le tableau suivant.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> - Excellente efficacité d'arrosage à la parcelle ; - Excellent rendement des cultures ; - Bonne adaptation à l'utilisation des eaux salées ; - Très faibles besoins en main-d'œuvre ; - Coûts d'entretien réduits ; - Insensibilité au vent ; - Absence de mouillage du feuillage (favorable d'un point de vue phytosanitaire) ; - Faible mouillage du sol (favorable aux façons culturales) ; - Prolifération limitée des adventices. 	<ul style="list-style-type: none"> - Coût globalement élevé (donc technique réservée aux cultures à forte valeur ajoutée) ; - Haut degré de compétences exigé à tous les niveaux (études préliminaires agro-pédologiques, conception de l'installation, conduite des arrosages par l'irrigant) ; - Maintenance rigoureuse nécessaire (du fait des risques liés à d'éventuelles interruptions des arrosages) ; - Filtration de l'eau d'irrigation nécessaire ; - Matériel délicat à durée de vie relativement faible ; - Recyclage des gaines en plastiques difficile.

Avantages et inconvénients spécifiques de l'irrigation localisée.
Source : Elaboré à partir des données recueillies dans (TIERCELIN, 1998).

Annexe 31 : Les différents problèmes techniques de l'irrigation localisée.

Le colmatage des goutteurs

Le problème de l'irrigation localisée réside dans le phénomène de bouchage ou de colmatage partiel dont le contrôle est plus ou moins difficile à effectuer suivant les systèmes et les cultures employés. Les principales causes du colmatage des distributeurs sont d'origine physique, chimique et biologique. (PNUD - FAO - OMS, 1998)

Le bouchage physique

Le bouchage peut être provoqué par des éléments minéraux ou organiques en suspension dans l'eau (sable limon, débris végétaux). Ces éléments se déposent dans le réseau d'irrigation en particulier au niveau des rampes et des distributeurs où la vitesse d'écoulement de l'eau est faible, provoquant ainsi la diminution de la section de passage et parfois le bouchage complet des distributeurs. Ces phénomènes peuvent être accentués par l'injection de certains minéraux (engrais).

Le colmatage chimique

Certaines eaux contiennent des éléments chimiques dissous, en état d'équilibre dans le milieu d'origine. L'équilibre peut être rompu sous l'effet d'un changement de température ou de pH favorisant la précipitation de certains éléments chimiques à la sortie des distributeurs.

Le colmatage biologique

Les eaux de surface contiennent des microorganismes vivants qui se développent dans le réseau d'irrigation où ils trouvent des conditions favorables à leur multiplication. Ces micro-organismes se fixent sur les parois et favorisent l'adhésion des éléments solides (argile, limon, etc.) en suspension dans l'eau. Ce phénomène entraîne la réduction de la section de passage de l'eau dans la conduite et le colmatage des distributeurs. Le bouchage brutal des distributeurs est provoqué en général par des éléments grossiers d'origine minérale ou organique en suspension dans l'eau.

Le colmatage des filtres

Il n'y a pas d'irrigation localisée sans filtration. Elle a pour rôle d'extraire de l'eau les impuretés susceptibles d'empêcher le bon fonctionnement du réseau d'irrigation, notamment en obstruant les goutteurs. Les dispositifs de filtration doivent ainsi être adaptés aux caractéristiques de l'eau utilisée et aux goutteurs. Pour nos essais, nous avons utilisés deux filtres à tamis.

Au fur et à mesure qu'un filtre se colmate, les pertes de charge à travers le filtre augmentent, ce qui entraîne une baisse de pression à sa sortie. Lorsque la différence de pression entre l'entrée et la sortie du filtre atteint 0,3 à 0,5 bar, il est nécessaire de nettoyer les filtres. Malgré les nettoyages, des dépôts finissent par altérer la perméabilité des filtres, plus ou moins rapidement selon la qualité de l'eau. (RIEUL et RUELLE, 2003)

Bonnes pratiques d'opération et de maintenance

Une mauvaise opération ou un manque d'entretien des systèmes en place affectent fortement leurs performances. (ARRIGHI DE CASANOVA et HABJOKA 2009)

Par exemple, on observe auprès des services techniques de l'agriculture que, au lieu de renouveler les lignes de goutteurs tous les 5 à 10 ans, les agriculteurs doivent les remplacer après trois à quatre ans. Du fait d'une filtration mal maîtrisée, les goutteurs se colmatent progressivement, l'uniformité de l'irrigation en est fortement affectée et les rendements en sont diminués dès la troisième année de mise en service.

Dans le cas des eaux usées traitées, une bonne filtration en-tête de réseau est essentielle pour garantir un fonctionnement correct des systèmes pressurisés. On effectue souvent dans ce cas une combinaison entre une filtration sur sable et une filtration à tamis.

En trouvant une solution technique à chaque mode de filtration et en sensibilisant les agriculteurs, les techniciens et les fournisseurs à l'intérêt technique et économique de ces modèles, une meilleure pratique de la filtration se répand peu à peu. (ARRIGHI DE CASANOVA et HABJOKA 2009)

Annexe 32 : Caractérisation des deux sites d'étude : Fuveau et Bouc-Bel-Air.

Les deux sites expérimentaux choisis se situent à la sortie des STEP à boues activées des villes de Fuveau et de Bouc-Bel-Air. Cette répétition des essais sur ces deux sites permet une plus grande fiabilité des données.

Les stations d'épuration de Fuveau et de Bouc-Bel-Air

Il s'agit de stations d'épuration à boues activées dont les eaux issues du traitement secondaire (sortie de clarificateurs) sont injectées dans les goutteurs. Leurs zones de rejet étant considérées comme fragiles un traitement de déphosphoration est ajouté sous forme de chlorure ferrique (FeCl_3). Les tableaux ci-dessous présentent les principales caractéristiques de ces deux STEP.

Capacité nominale	3870 m ³ /j = 20 000 EH = 1 200 KgDBO ₅ /j
Exploitation/Gestion	Société des Eaux de Marseille (SEM)
Mise en service	2007
Rendement moyen sur la DBO₅	98,9%
Nature du sol	Alluvions à dominante argileux

Caractéristiques de la STEP de Bouc-Bel-Air.

Source : (MALAMAIRE, 2010a).

Capacité nominale	2400 m ³ /j = 12 000 EH = 720 KgDBO ₅ /j
Exploitation/Gestion	Société des Eaux de Marseille (SEM)
Mise en service	2005
Nature du sol	Argileux (vitesse d'infiltration faible)

Caractéristiques de la STEP de Fuveau.

Source : (MALAMAIRE, 2010b).

Le fonctionnement et l'entretien du dispositif sont satisfaisants (rendement moyen sur la DBO₅ de 98,9%). La production de boues est cohérente avec le type de traitement et les rendements épuratoires mesurés. (ARPE 2010a et ARPE 2010b)

En moyenne entre février 2007 et mai 2009, ces deux stations ont traité de 50 à 55% (11050 EH) de leur capacité de traitement de la pollution exprimée en DBO₅, et 91% de leur capacité hydraulique (ARPE 2010a et ARPE 2010b). Ceci montre que le système d'assainissement est très sensible aux intrusions d'eaux parasites (pluies) ou d'eaux de nappes. Les dépassements de la capacité hydraulique de la station sont fréquents. Ils peuvent être très importants et provoquer un by-pass des ouvrages de traitement vers la rivière située en aval, ou encore un départ de boues provoqué par cet accoût hydraulique. (ARPE 2010a et ARPE 2010b)

Ces stations sont déjà équipées d'une installation d'arrosage localisée pour leur espace vert (groupe de motopompes, filtre, manomètres, régulateurs de pressions). Nous avons connecté notre installation sur celles existantes. (cf. Annexe 33)

Caractéristiques des EUT réutilisées

Hebdomadairement sont effectués des tests de terrain portant sur les paramètres nitrates, ammonium et phosphates. En parallèle, ces stations sont soumises à un contrôle d'autosurveillance réglementaire. Cela consiste à la réalisation sur 24 heures de deux bilans par mois. En revanche, la bactériologie n'est pas mesurée. Ces STEP ne sont en effet pas soumises à une obligation de traitement sur ces paramètres.

		DBO	DCO	MES	NTK	NNH4	NNO2	NNO3	NGL	PT
Bouc-Bel-Air (en kg/j)	Maximum	11,4	121	8,47	10,9	8,49	0,17	2,42	13,5	0,85
	Minimum	6,1	61	4,55	2,44	2,28	0,024	0,41	4,09	0,21
	Moyenne	22,9	376	20,3	37,2	37,3	0,53	6,63	38,3	2,9
Fuveau (en kg/j)	Maximum	4,26	47,6	4,63	5,39	3,78	0,087	2,44	6,92	0,57
	Minimum	2,54	27,3	1,69	0,91	0,85	0,011	0,095	1,72	0,13
	Moyenne	17,6	176	11,7	42,4	39,8	0,43	26,3	43,1	2,96

Résultats des analyses physico-chimiques, de 2008, des EUT des STEP de Fuveau et de Bouc-Bel-Air.

Source : Elaboré à partir des données recueillies dans les documents (COMBE, 2008) et (COMBE et VAHTAR, 2008).

Le ci-dessus reprend les synthèses d'autosurveillance, relatives aux analyses physico-chimiques, de l'année 2008. Le tableau ci-dessous, quant à lui, suggère des fourchettes pour les analyses bactériologiques des stations considérées. L'élaboration de ces fourchettes se base sur les résultats d'analyses bactériologiques d'autres stations d'épuration très semblables à celles de Fuveau et de Bouc-Bel-Air, que nous a transmis Giles MALAMAIRE de l'ARPE.

	Campagne été	Campagne automne
Entérocoques intestinaux (NPP/100 mL)	[9 000 ; 10 000]	[13 000 ; 21 000]
Escherichia Coli (NPP/100 mL)	[55 000 ; 116 000]	[34 000 ; 35 000]

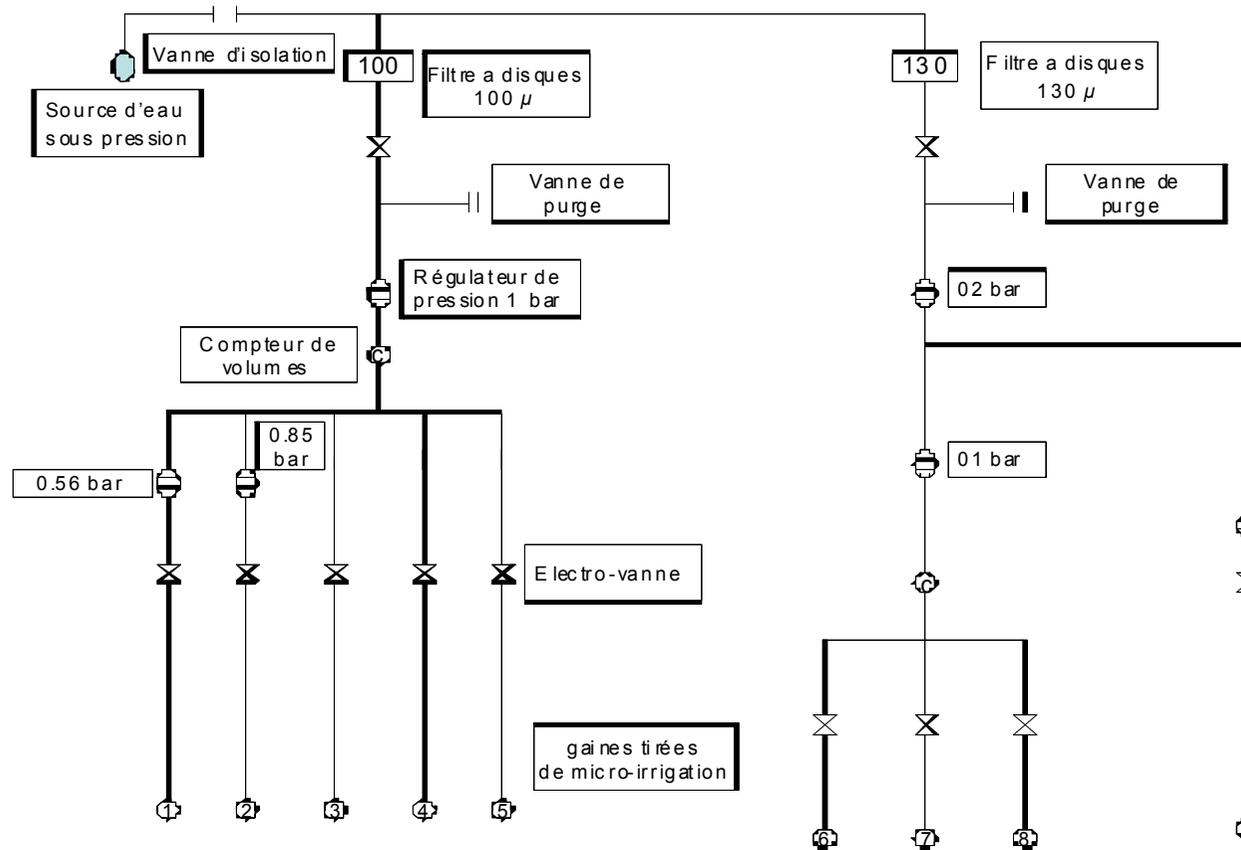
Analyses bactériologiques représentatives des STEP de Fuveau et de Bouc-Bel-Air.

Caractéristiques des terrains

Les deux sites d'étude présentent une topographie légèrement différente. Ainsi, certains goutteurs se situent dans des sortes de petites cuvettes et seront plus susceptibles d'être immergés dans l'eau (eau de pluie ou EUT). Cette immersion peut être à l'origine d'un plus grand développement d'algues par exemple et peut donc fausser les résultats obtenus. Il est donc important de prendre en considération cet élément dans l'interprétation des résultats.

Il serait également intéressant de se pencher sur une solution alternative telle que la surélévation des rampes de goutteurs. Ce système réglerait le problème cité précédemment et faciliterait les mesures de débit.

Annexe 33 : Schéma général du dispositif expérimental mis en place sur les sites de Fuveau et de Bouc-Bel-Air.



Annexe 34 : Descriptif technique des différents goutteurs utilisés.

(RIEUL et RUELLE, 2003)

Les goutteurs apportent l'eau à la surface du sol de manière ponctuelle. Ces distributeurs se caractérisent par un faible débit (€ [1 ; 8] L/h). Dans la pratique, les débits les plus courants sont : 2L/h pour les cultures maraîchères ou sous-abri, et 4L/h pour les cultures pérennes (arbres fruitiers, vignes).

A travers le goutteur, l'eau suit un cheminement plus ou moins long qui provoque la dissipation de la pression sous forme de perte de charge. On distingue les goutteurs à circuit uniforme (où la section de l'eau est constante tout le long du cheminement) et les goutteurs à circuit non-uniforme (dits à chicanes ou à labyrinthe). Ces derniers correspondent à ceux utilisés pour nos essais. Les chicanes qui composent l'intérieur de ce type de goutteur provoquent des changements brusques de direction induisant un effet de turbulence qui va venir s'ajouter aux frottements le long des parois.

Pour nos essais, nous avons utilisé trois types de goutteurs différant notamment par leurs modes de fixation sur la rampe :

- 1) Les goutteurs montés en dérivation (On-line) sont fixés sur la rampe par l'intermédiaire d'un embout appelé « tête de vipère ».
- 2) Les goutteurs intégrés (In-line) sont directement mis en place dans le tuyau lors de son extrusion.
- 3) Les gaines sont constituées de tuyaux en plastique qui assurent à la fois les fonctions de transport et de distribution de l'eau. Elles sont fabriquées par soudure ou par extrusion. Aplaties au repos, elles se gonflent sous l'effet de la pression. On distingue là aussi différents types de gaines
 - a) Les gaines à cheminement long
 - b) Les gaines perforées à double paroi
 - c) Les gaines autorégulantes
 - d) Les tubes poreux

Annexe 35 : Les différents modèles de goutteurs utilisés pour les sites de Fuveau et de Bouc-Bel-Air.



Annexe 36 : Caractéristiques des matériels utilisés sur les sites de Fuveau et de Bouc-Bel-Air.

Ligne	Constructeur	Type de goutteurs	Modèle	Débit (L/h)	Pression de service (bar)	Diamètre de la gaine (mm)	Espacement (m)	Filtration (µm)
1		Gaine	T-Tape	1	0,56	16	0,30	100
8		G-Inline	Hydrogol	2	1	16	0,30	130
9		G-Online	Super-Tiff	3,85	2	20	0,50	130
3		Gaine	Tape	0,97	1	16	0,20	100
4		G-Inline	J-Turbo Aqura	2,4	1	16	0,30	100
5		G-Online	J-Turbo Key	4	1	16	0,50	100
2		Gaine	Streamline	0,98	0,85	16	0,30	100
6		G-Inline	Bioline AS	1,6	1	16	0,30	130
7		G-Online	PC Basic	4	0,5 à 4	20	0,50	130

Annexe 37 : La loi débit-pression caractérisant les différents goutteurs testés.

Des régulateurs de pression ont été installés en amont des lignes afin de régler la pression de service conçue pour chaque modèle de goutteurs. En fonction de cette pression, le débit sortant de chaque type de goutteurs pour chacun des modèles de marques a été vérifié par échantillonnage, selon la loi débit-pression.

La loi débit-pression lie le débit (Q) d'un orifice de sortie à la pression (H) qui règne en entrée d'un goutteur. Elle se traduit par l'équation suivante :

$$Q = K \times H^x$$

Avec :

Q = Débit du goutteur (en L/h)

H = Pression s'exerçant dans la rampe (en mCE¹)

K = Constante adimensionnelle

x = Exposant caractéristique du goutteur

K et x sont des constantes ajustées à partir des débits moyens de 4 échantillons caractérisant le goutteur au plan hydraulique, sur la gamme de pression de fonctionnement.

(RIEUL et RUELLE, 2003)

A partir de cette équation, en connaissant les caractéristiques (K et x) de chaque goutteur, il est possible de tracer la courbe débit-pression spécifique à chaque goutteur, et donc de connaître le débit théorique du goutteur en fonction de la pression disponible.

En fonction de la sensibilité de leur débit aux variations de pression, on distingue deux types de goutteurs :

- 1) Les goutteurs autorégulants, dont le débit, sur une certaine plage de valeurs, est pratiquement indépendant de la pression. La régulation est obtenue par une membrane élastique qui obture plus ou moins le passage de l'eau selon la pression. Ces goutteurs sont caractérisés par une valeur de x proche de 0. (RIEUL et RUELLE, 2003) Pour ce type de goutteur, si la pression en entrée se situe dans la plage de valeurs pour laquelle le débit est quasi-constant, alors nous connaissons le débit nominal correspondant.
- 2) Les goutteurs non-autorégulants, dont le débit varie en fonction de la pression dans la rampe. Ils se caractérisent par un x appartenant à l'intervalle [0,38 ; 0,8]. Plus la valeur de x est faible, moins le goutteur est sensible aux variations de pression. Pour ce type de goutteurs, nous utiliserons les courbes débit-pression afin de gommer l'effet de la variation de la pression le long de la gaine sur le débit délivré par les goutteurs. Les lois débit-pression de ces goutteurs sont regroupées ci-après.

Pour nos essais nous disposons de trois goutteurs auto-régulants et de six non-autorégulants. Les tableaux ci-dessous présentent les lois débit-pression qui les caractérisent.

	JDW Gaine T-Tape	NTF Gaine Streamline	NDJ Gaine Tape	NDJ In-line J-Turbo Aqura	NDJ On-line J-Turbo Key	JDW In-line Hydrogol
K	0,4361	0,3763	?	2,4	1,334	0,586
x	0,5012	0,468		0,49	0,4756	0,4893
Q	0,4361×H^{0,5012}	0,3763×H^{0,468}		2,4×H^{0,49}	1,334×H^{0,4756}	0,586×H^{0,4893}

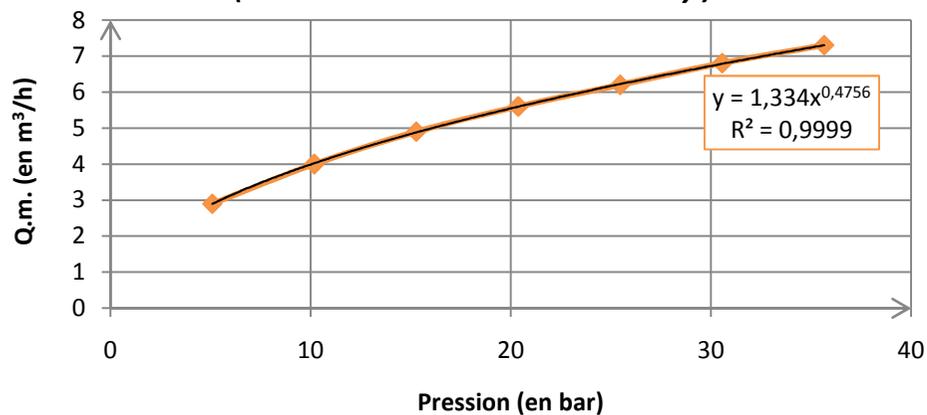
Lois débit-pression des goutteurs non-autorégulants utilisés pour nos essais.

	NTF In-line Bioline AS	NTF On-line PC Basic	JDW On-line Super Tif
P (en bar)	1 à 2	0,5 à 4	0,6 à 3,5
Q (en L/h)	1,6	4	3,85

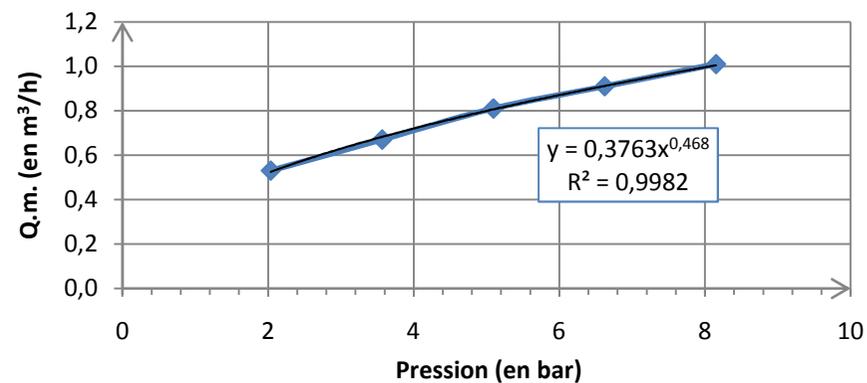
Caractéristiques des goutteurs autorégulants utilisés pour nos essais.

¹ 1 mCE = 1 mètre de colonne d'eau = 0,1 bar.

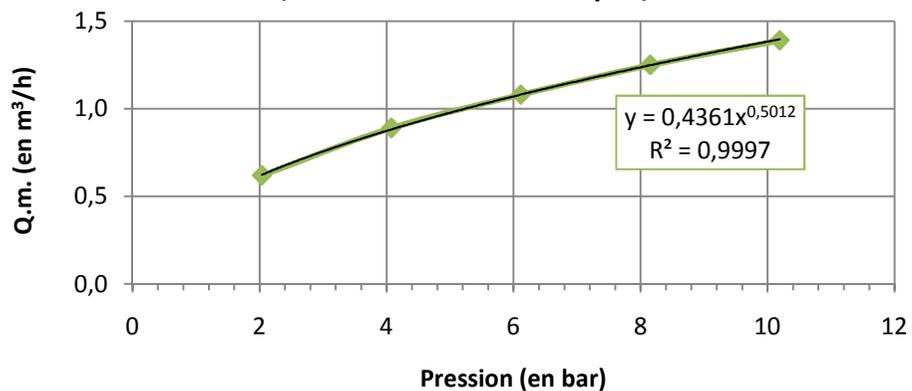
Loi débit-pression
(NDJ On-line J-Turbo Key)



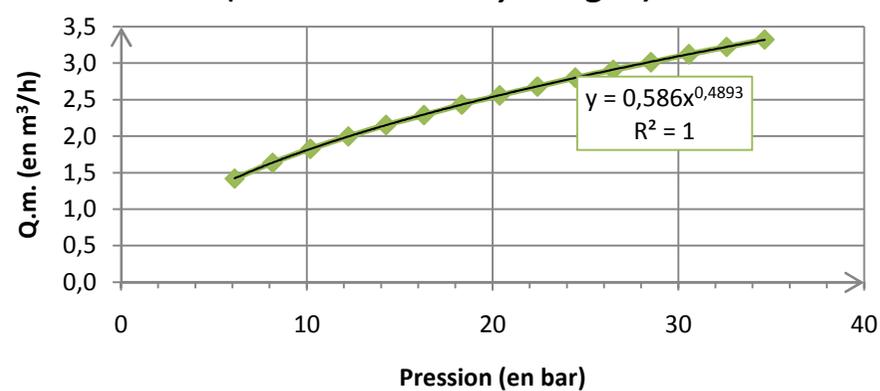
Loi débit-pression
(NTF Tape Streamline)



Loi débit-pression
(JDW Gaine T-Tape)



Loi débit-pression
(JDW In-line Hydrogol)



Annexe 38 : Inventaire des différents composants du dispositif expérimental.

Pompe

Pour notre expérimentation, est placée, à la sortie du bac d'alimentation en eaux usées traitées, une pompe refoulant un débit de 1 m³/h.

Manomètre

Chaque ligne est équipée de deux manomètres : un à l'entrée et un à la sortie de chaque ligne. Cet équipement permet de vérifier la stabilité de la pression au niveau de l'installation et de mesurer la perte de charges le long de la ligne.

Filtre à disques

Le choix du filtre est fonction de la qualité des eaux utilisées et du type de goutteurs placés en aval. Dans notre cas, deux filtres à disques ont été installés. Ils possèdent respectivement une capacité filtrante de 100 µm pour les lignes 1 à 5, et de 130 µm pour les lignes 6 à 9.

Régulateur de pression

Le régulateur de pression permet de protéger l'installation des surpressions, et maintien la pression de service à une valeur constante à sa sortie.

Compteurs

Les compteurs placés à l'entrée et à la sortie de l'installation permettent de vérifier la vitesse d'écoulement au niveau des gaines ainsi que le volume cumulé débité par les goutteurs.

Goutteurs

Les goutteurs utilisés pour notre expérimentation sont non-autorégulant. Ils peuvent être facilement démontés, afin d'observer les phénomènes de colmatage éventuels.

Quarante goutteurs ont été placés sur chacune des gaines.

Vannettes

Des vannettes sont placées entre les canalisations d'alimentation des gaines et les gaines de distribution. Leur rôle est de réguler le débit à l'entrée et à la sortie du réseau. Elles permettent également d'interrompre l'alimentation d'une ligne lorsque le besoin est (ex : examen des gaines et des goutteurs, modifications d'une partie du dispositif sans perturber l'alimentation du reste de l'installation).

Raccords

Les raccords permettent de coupler tous les compartiments qui composent l'installation d'irrigation (pompes, canalisations, gaines, vannettes, etc.).

By-pass avec venturi

Le by-pass est monté en aval de la pompe. Il permet d'injecter la solution de nettoyage dans le réseau afin de traiter les colmatages éventuels.

Annexe 39 : Présentation des coefficients d'uniformité des différents goutteurs testés sur les sites de Fuveau et de Bouc-Bel-Air.

Dates	1		2		3		4		5		6		7		8		9	
	CU	ΔCU																
22/07/2010	81,0%	±1,7	87,4%	±1,4	89,1%	±1,0	92,4%	±0,3	92,0%	±0,2	91,6%	±0,8	98,7%	±0,2	95,7%	±0,3	95,1%	±0,3
29/07/2010	85,0%	±0,8	87,4%	±0,9	96,1%	±0,6	90,1%	±0,3	94,9%	±0,2	98,1%	±0,7	99,1%	±0,2	99,6%	±0,3	96,0%	±0,3
05/08/2010	84,7%	±0,8	80,3%	±0,8	83,4%	±0,8	96,5%	±0,3	89,0%	±0,3	92,6%	±0,7	99,0%	±0,2	89,8%	±0,4	84,6%	±0,5
18/08/2010	97,9%	±0,9	97,0%	±0,2	87,7%	±1,2	96,5%	±1,6	97,0%	±0,6	88,9%	±0,4	98,3%	±0,9	99,2%	±0,2	87,9%	±0,3
26/08/2010	95,8%	±0,9	92,4%	±1,6	97,9%	±0,5	96,5%	±0,4	95,6%	±0,2	95,5%	±0,6	99,5%	±0,2	96,5%	±0,9	97,0%	±0,3
02/09/2010	96,4%	±0,8	94,9%	±1,4	99,1%	±0,7	94,1%	±0,4	98,4%	±0,2	98,8%	±0,6	90,5%	±0,3	98,1%	±0,5	99,0%	±0,2
09/09/2010	97,1%	±0,7	92,7%	±1,8	97,8%	±0,6	96,3%	±0,7	99,3%	±0,2	98,8%	±0,5	98,9%	±0,2	99,1%	±0,6	98,7%	±0,2
16/09/2010	98,5%	±1,1	94,3%	±1,7	97,3%	±1,2	93,5%	±0,6	97,8%	±0,4	94,7%	±0,5	98,7%	±0,2	96,8%	±0,5	97,3%	±0,3

Coefficients d'uniformités et incertitudes des lignes d'essais du site de Bouc-Bel-Air.

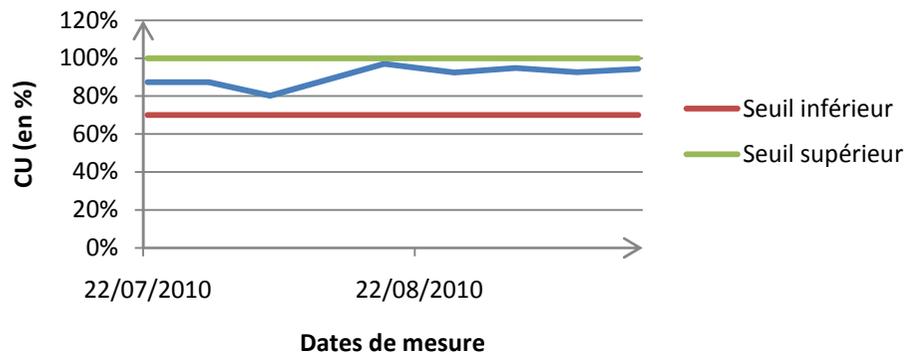
	Bon
	Moyen
	Mauvais

Dates	1		2		3		4		5		6		7		8		9	
	CU	ΔCU																
20/07/2010	72,9%	±0,9	69,0%	±1,1	52,3%	±1,2	60,8%	±0,6	67,2%	±0,2	67,7%	±2,1	73,4%	±0,3	65,1%	±0,5	72,7%	±0,3
27/07/2010	65,2%	±3,5	92,9%	±1,1	89,5%	±1,2	91,9%	±0,4	92,2%	±0,3	98,7%	±0,6	98,2%	±0,3	97,2%	±0,5	92,5%	±0,3
03/08/2010	91,0%	±1,2	57,0%	±1,5	80,0%	±0,8	98,0%	±0,5	94,5%	±0,2	86,5%	±0,7	98,9%	±0,3	96,4%	±0,4	93,5%	±0,3
18/08/2010	96,8%	±0,9	86,1%	±1,3	88,7%	±0,7	88,8%	±0,4	91,8%	±0,2	98,2%	±0,5	98,8%	±0,3	62,1%	±1,1	98,6%	±0,2
24/08/2010	84,1%	±0,9	88,1%	±1,1	91,2%	±0,7	97,5%	±0,5	96,1%	±0,2	94,6%	±0,6	98,4%	±0,3	97,7%	±0,4	96,9%	±0,3
31/08/2010	94,1%	±1	92,0%	±1,1	93,3%	±0,9	96,6%	±0,4	96,2%	±0,3	96,3%	±0,6	98,7%	±0,3	97,4%	±0,4	98,7%	±0,2
09/09/2010	96,6%	±1	93,1%	±0,9	98,5%	±0,7	98,4%	±0,4	91,9%	±0,2	98,8%	±0,6	98,8%	±0,3	96,6%	±0,4	97,6%	±0,2
16/09/2010	94,4%	±0,7	94,3%	±0,9	89,7%	±0,6	96,8%	±0,4	89,2%	±0,4	96,6%	±0,6	99,1%	±0,3	92,3%	±0,2	72,4%	±0,5
23/09/2010	92,1%	±0,9	89,6%	±1	94,8%	±0,9	94,4%	±0,4	93,1%	±0,2	95,7%	±0,6	98,8%	±0,3	94,0%	±0,5	98,4%	±0,3
29/09/2010	96,3%	±0,9	93,9%	±1,1	67,9%	±0,9	95,1%	±0,5	86,5%	±0,2	92,7%	±0,7	97,7%	±0,2	95,7%	±0,4	74,0%	±0,2

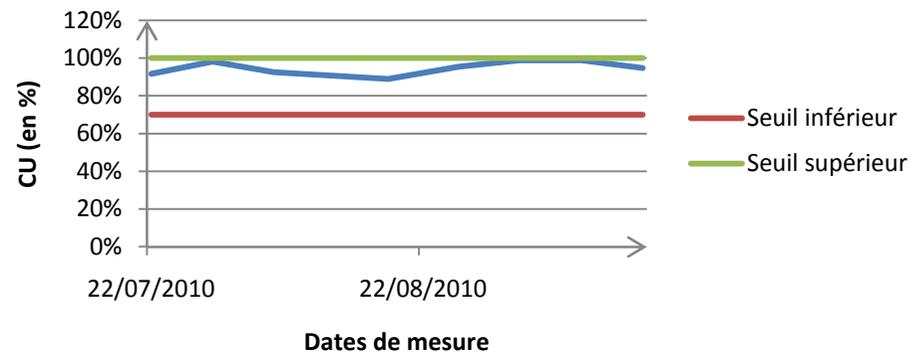
Coefficients d'uniformité des lignes d'essais du site de Fuveau.

Représentations graphiques des coefficients d'uniformités des différents goutteurs échantillonnés sur le site de Bouc-Bel-Air.

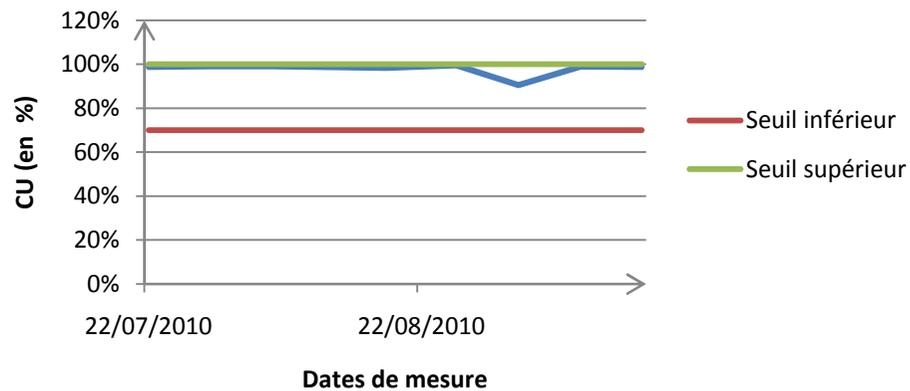
Evolution du CU au cours du temps (NTF Gaine Streamline)



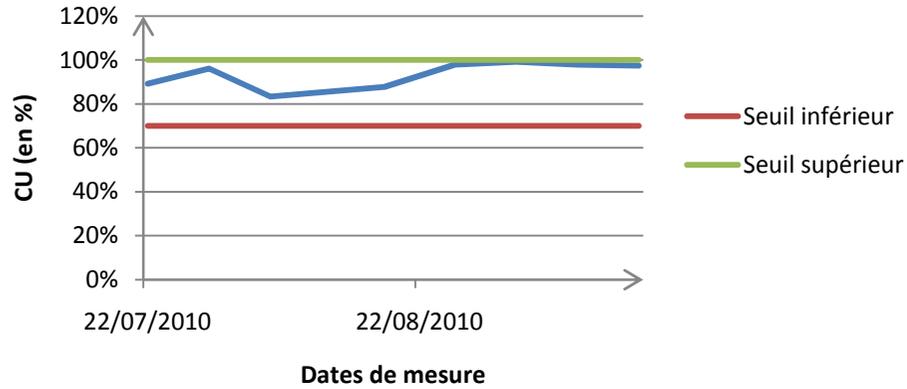
Evolution du CU au cours du temps (NTF In-line Bioline AS)



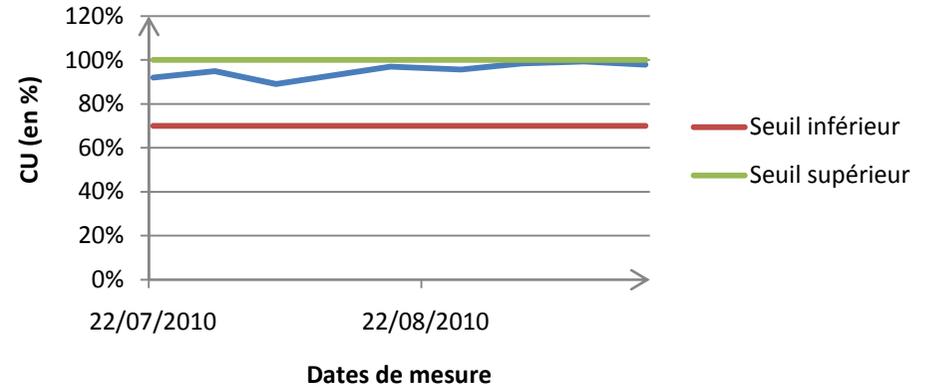
Evolution du CU au cours du temps (NTF On-line PC Basic)



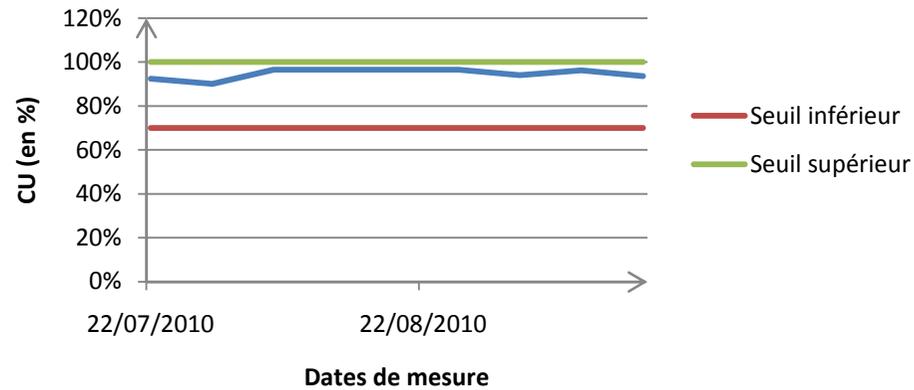
Evolution du CU au cours du temps (NDJ Gaine Tape)



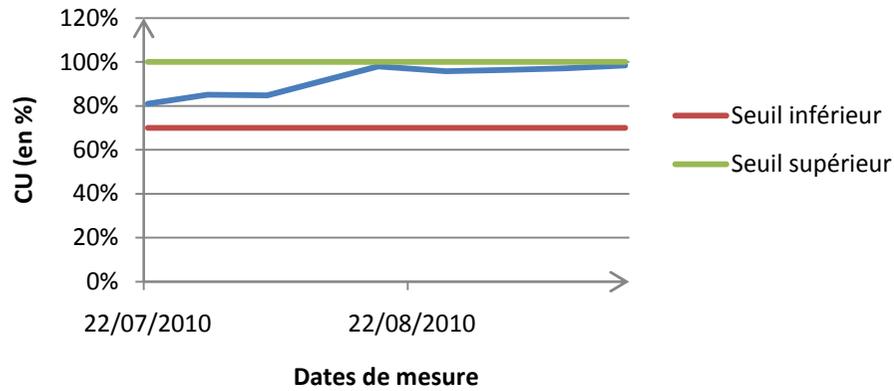
Evolution du CU au cours du temps (NDJ On-line J-Turbo Key)



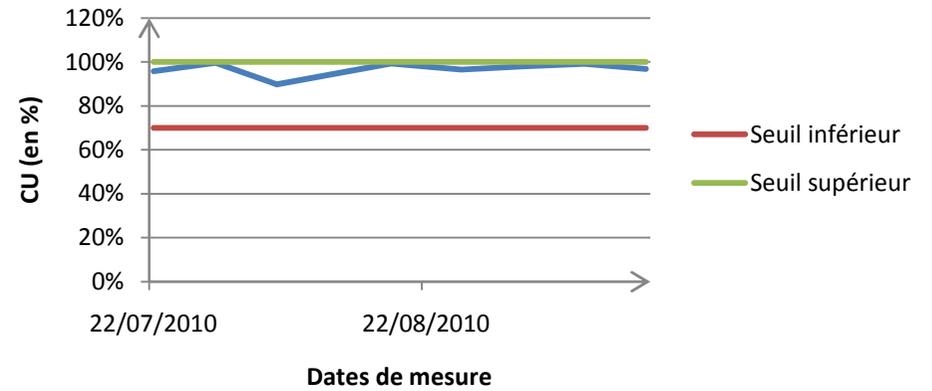
Evolution du CU au cours du temps (NDJ In-line J-Turbo Aqura)



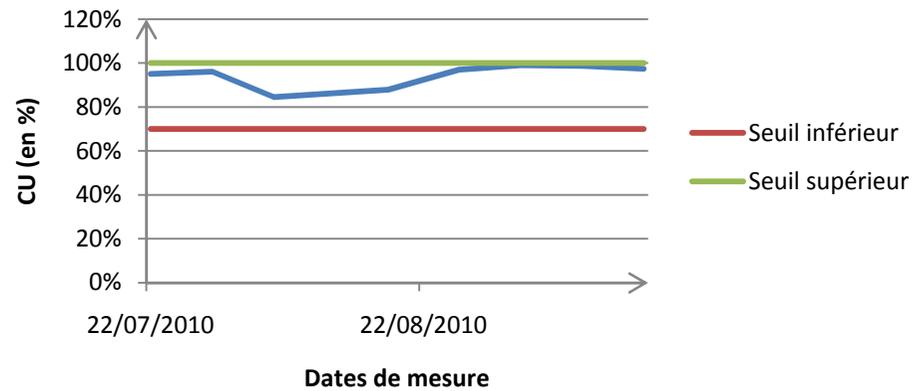
Evolution du CU au cours du temps (JDW Gaine T-Tape)



Evolution du CU au cours du temps (JDW In-line Hydrogol)

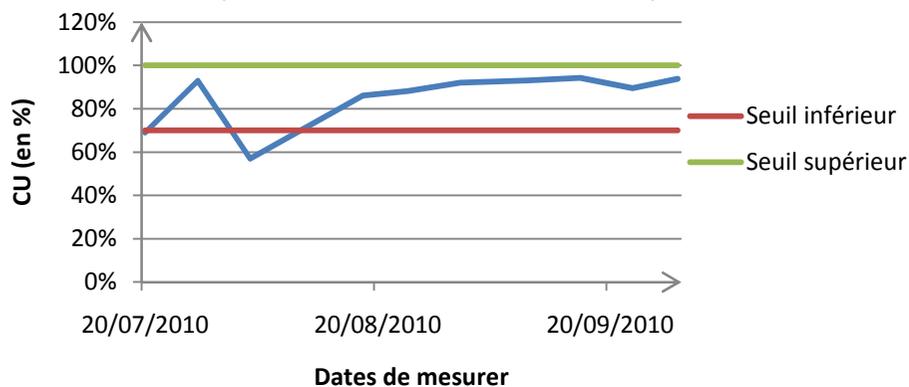


Evolution du CU au cours du temps (JDW On-line Super Tif)

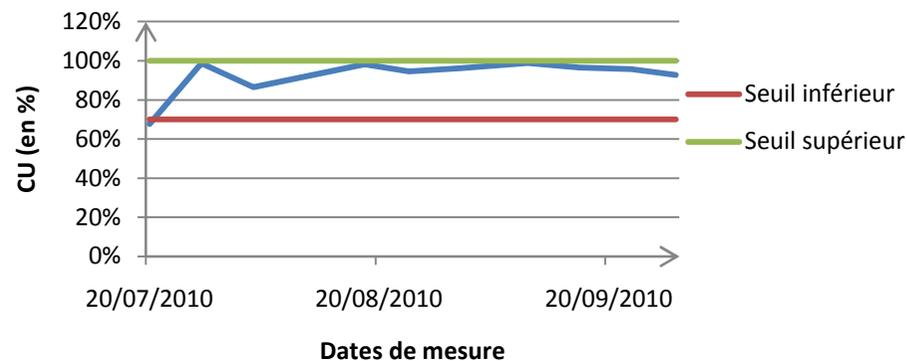


Représentations graphiques des coefficients d'uniformités des différents goutteurs échantillonnés sur le site de Fuveau.

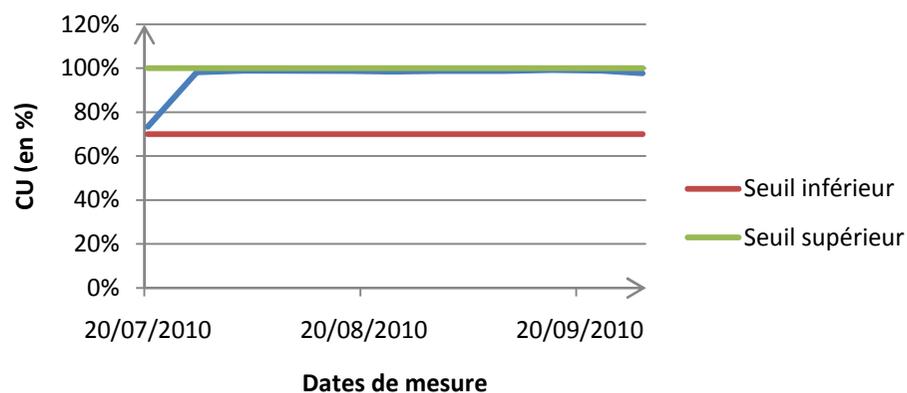
Evolution du CU au cours du temps
(NTF Gaine Streamline)



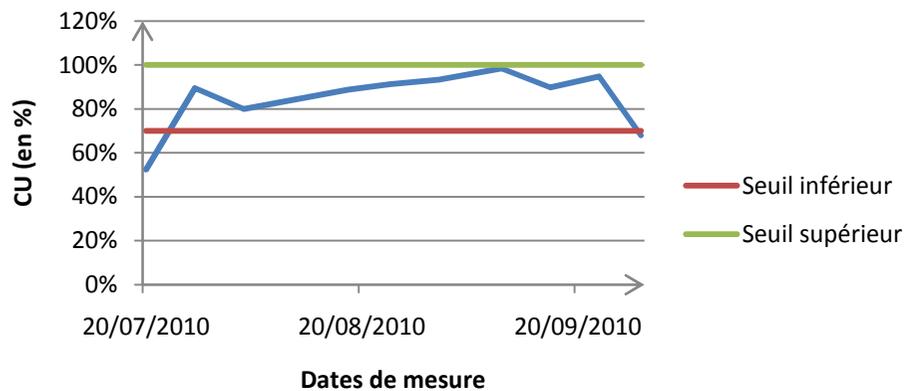
Evolution du CU au cours du temps
(NTF In-line Bioline AS)



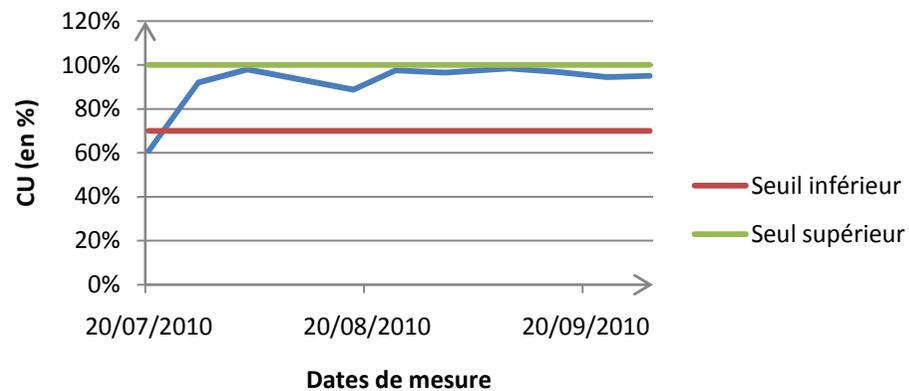
Evolution du CU au cours du temps
(NTF On-line PC Basic)



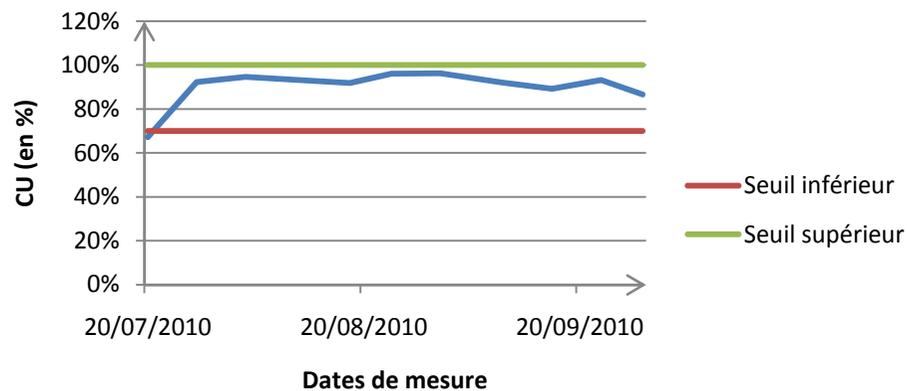
Evolution du CU au cours du temps (NDJ Gaine Tape)



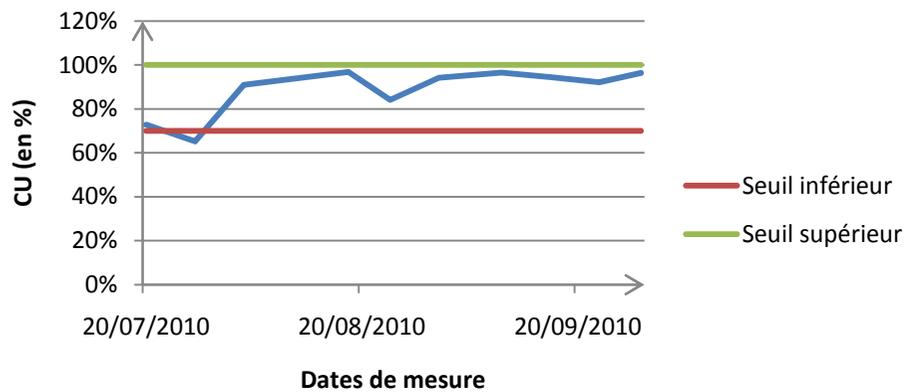
Evolution du CU au cours du temps (NDJ In-line J-Turbo Aqura)



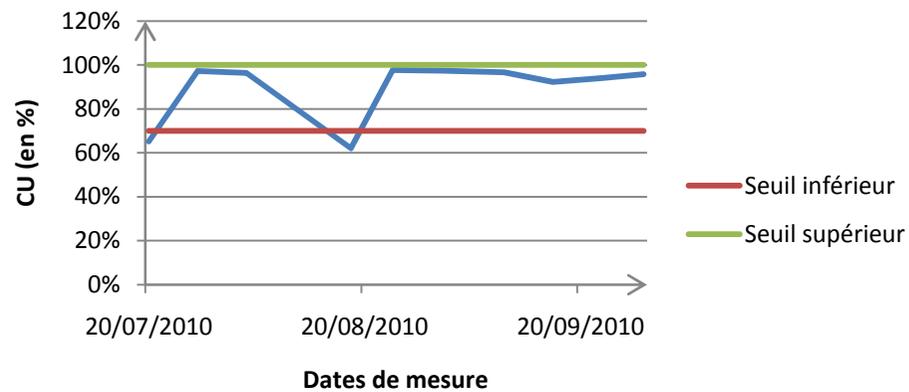
Evolution du CU au cours du temps (NDJ On-line J-Turbo Key)



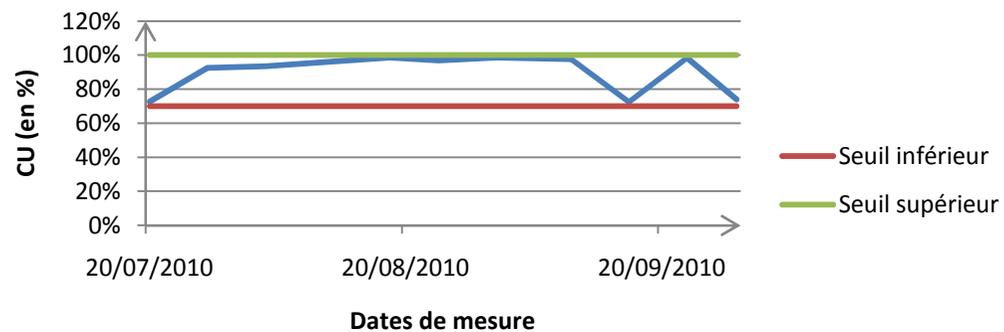
Evolution du CU au cours du temps (JDW Gaine T-tape)



Evolution du CU au cours du temps (JDW In-line Hydrogol)

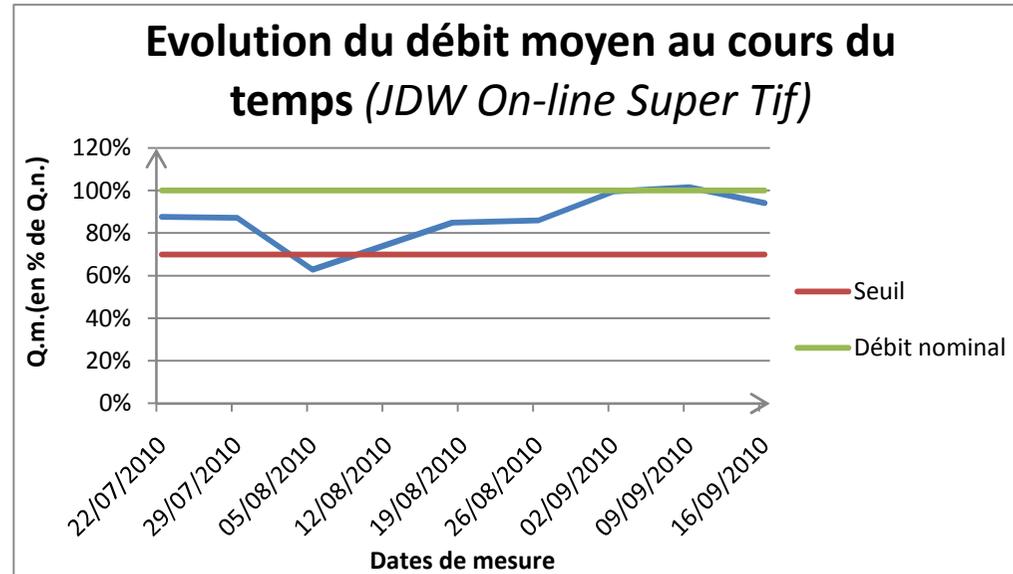
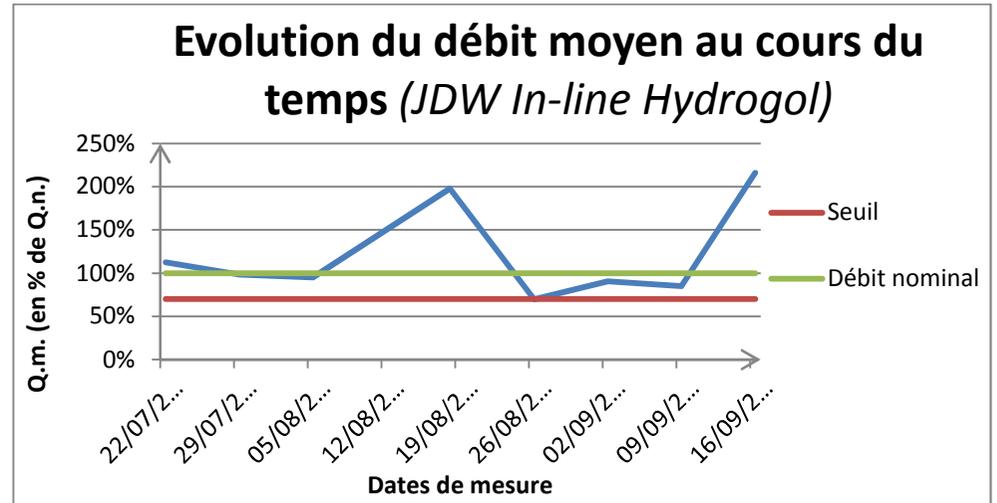
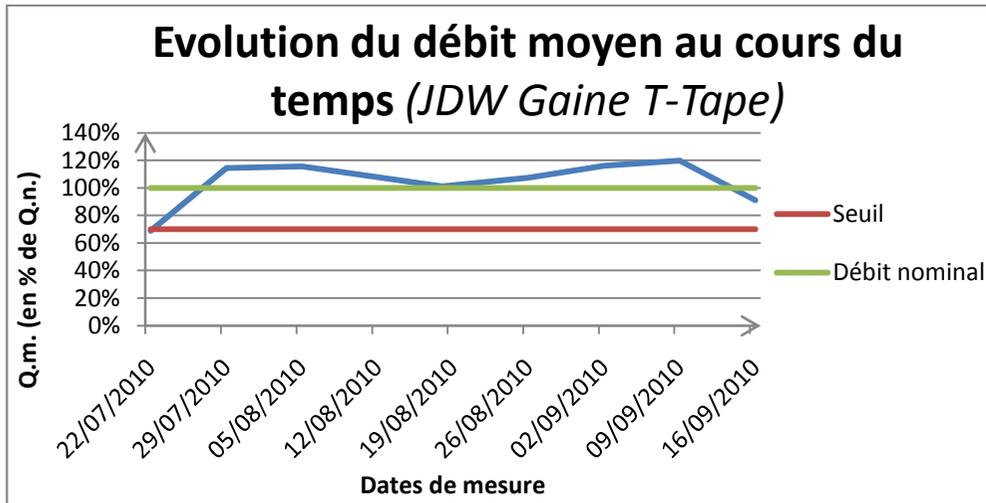


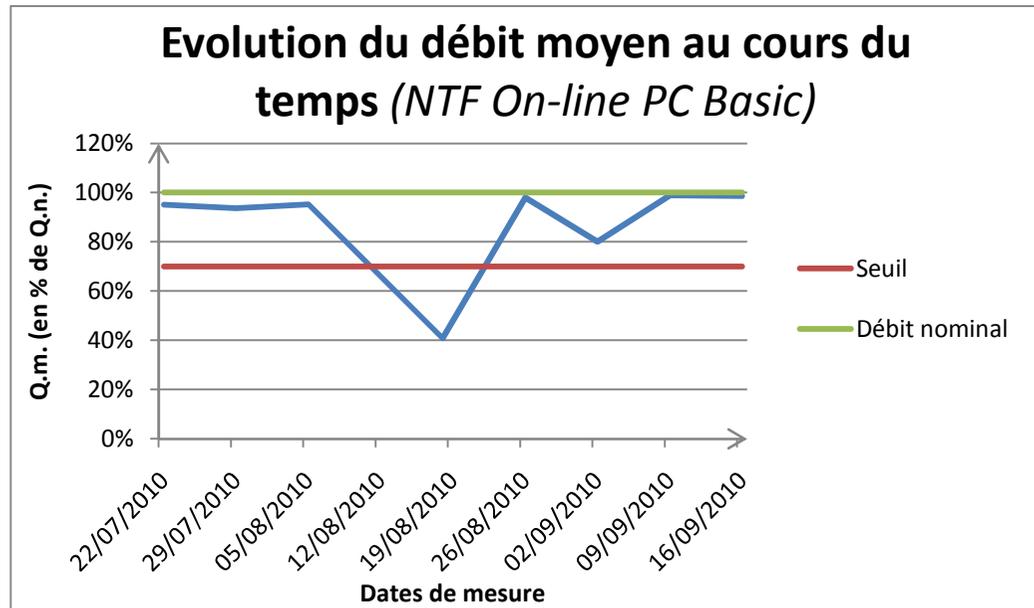
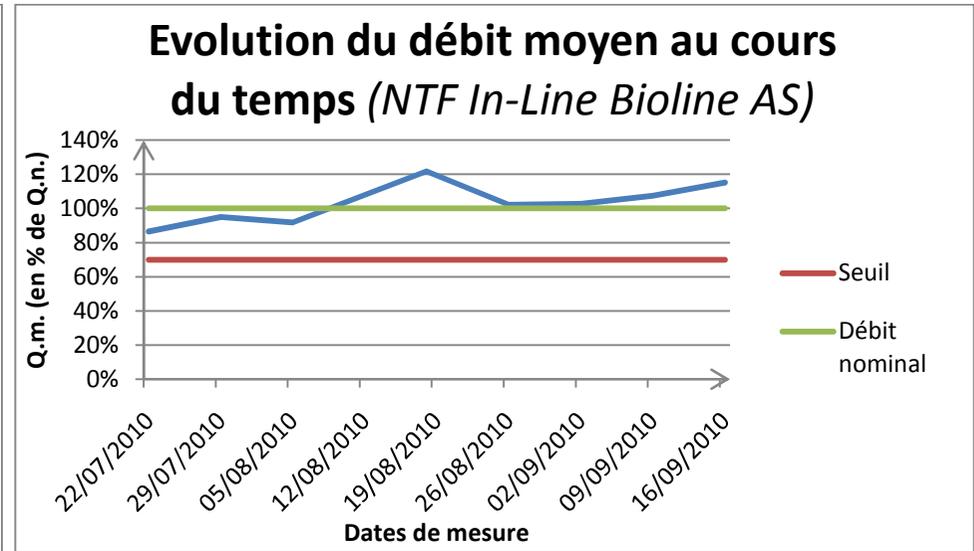
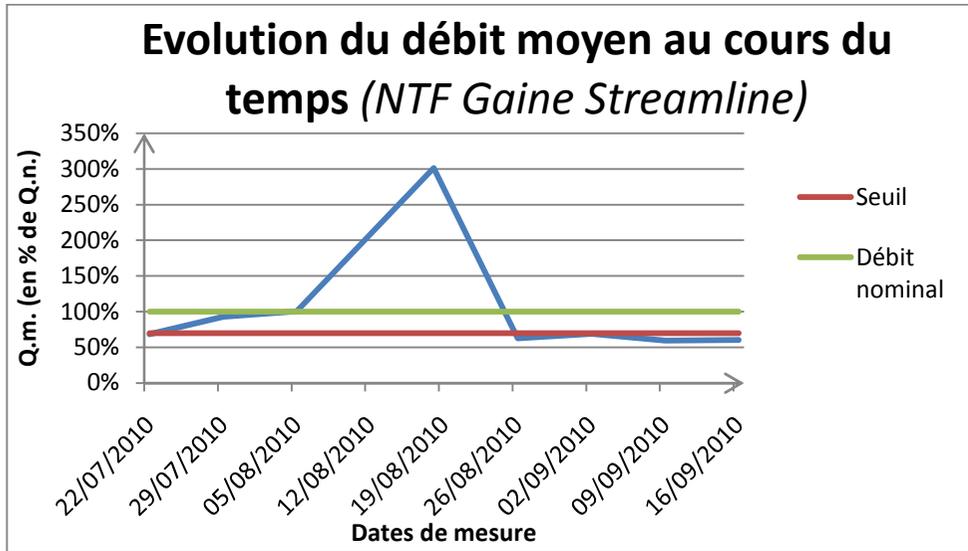
Evolution du CU au cours du temps (JDW On-line Super Tif)



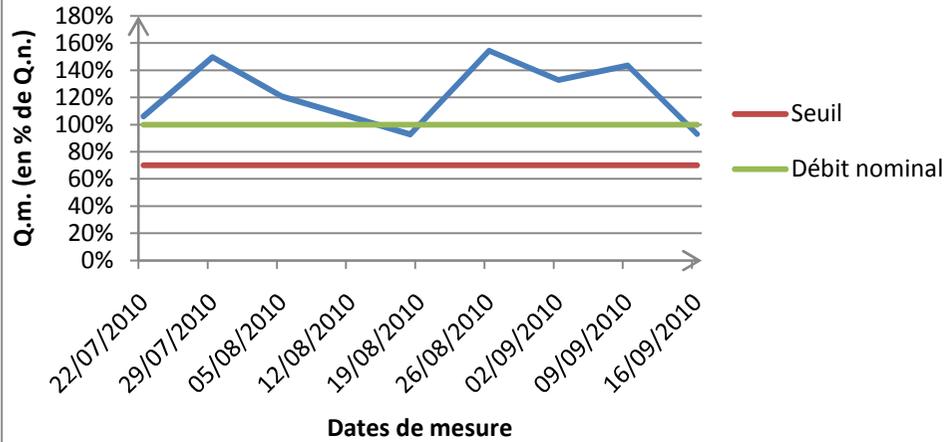
Annexe 40 : Présentation des débits moyens de chacune des lignes testées sur les sites de Fuveau et de Bouc-Bel-Air.

Représentations graphiques des débits moyens des différentes lignes testées sur le site de Bouc-Bel-Air.

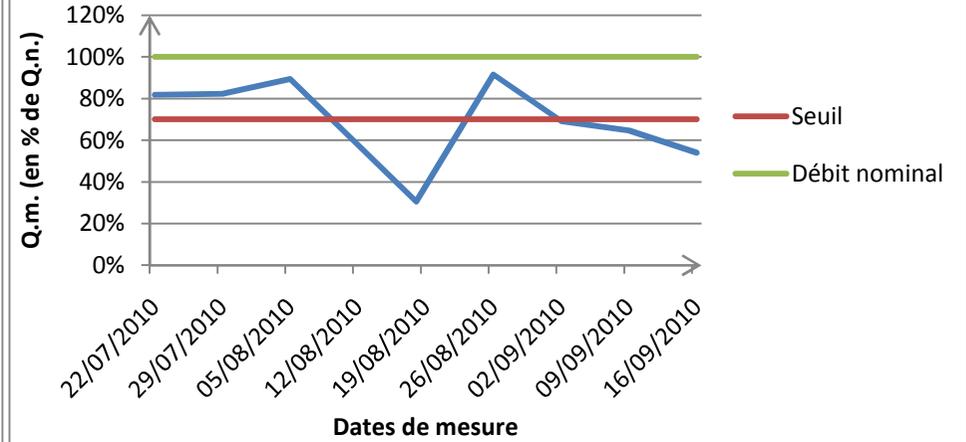




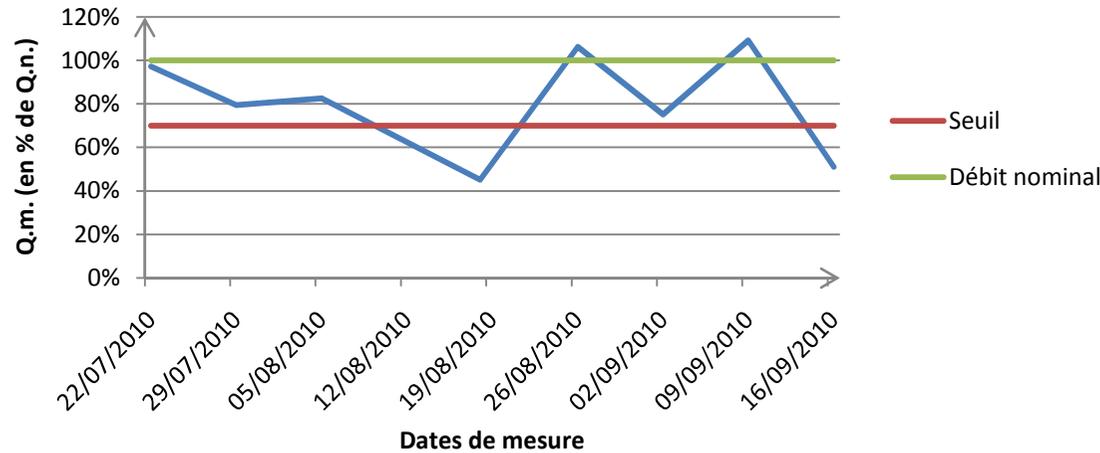
Evolution du débit moyen au cours du temps (NDJ Gaine Tape)



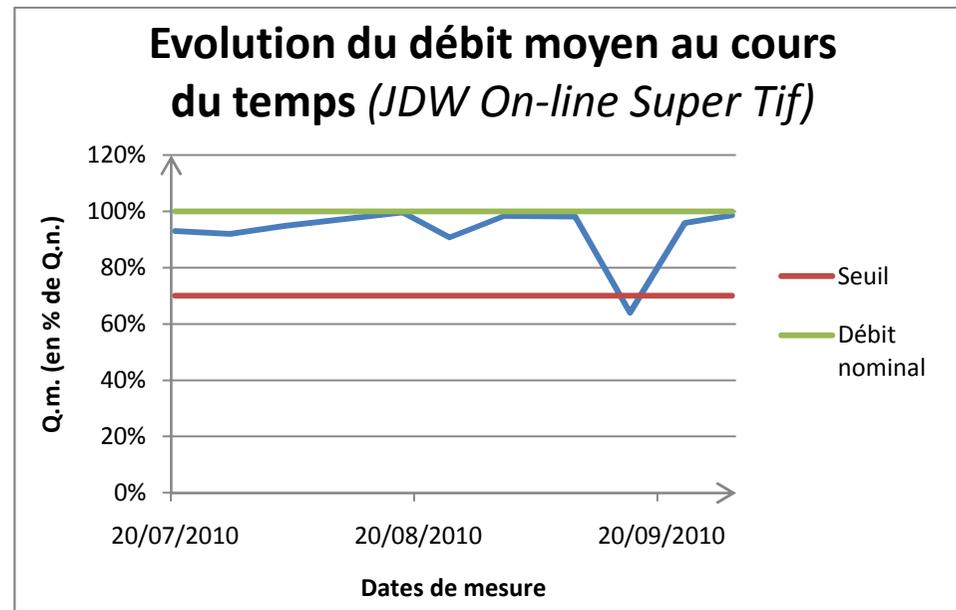
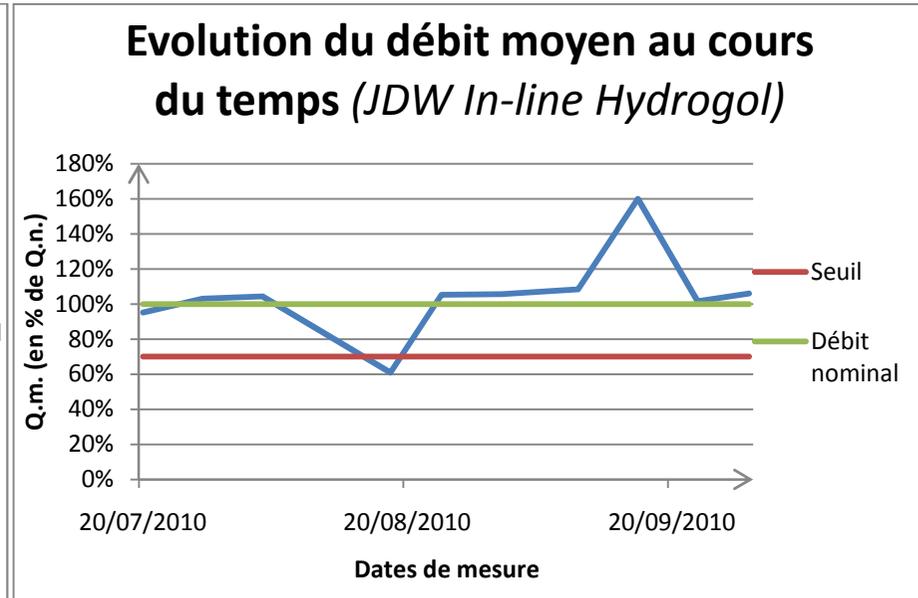
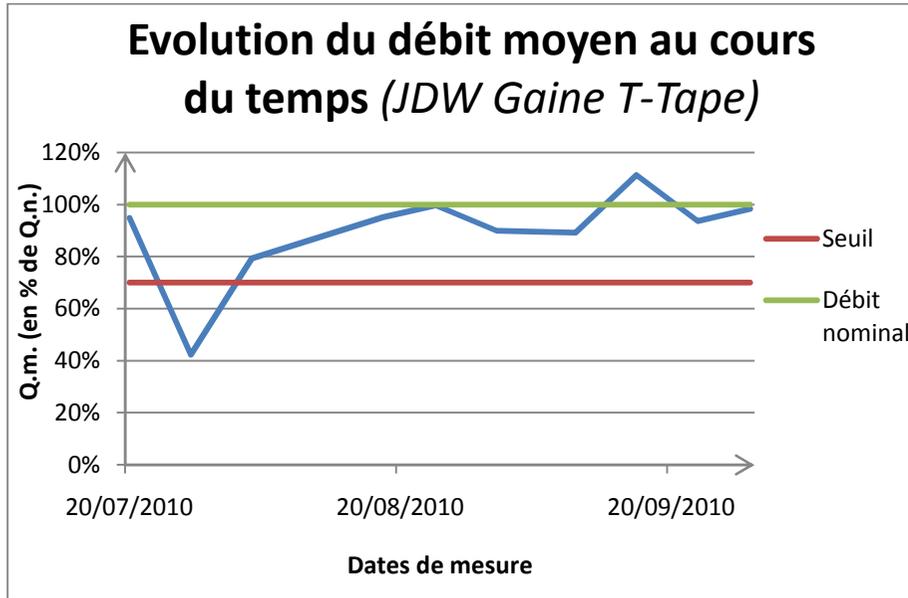
Evolution du débit moyen au cours du temps (NDJ In-line J-Turbo Aqura)

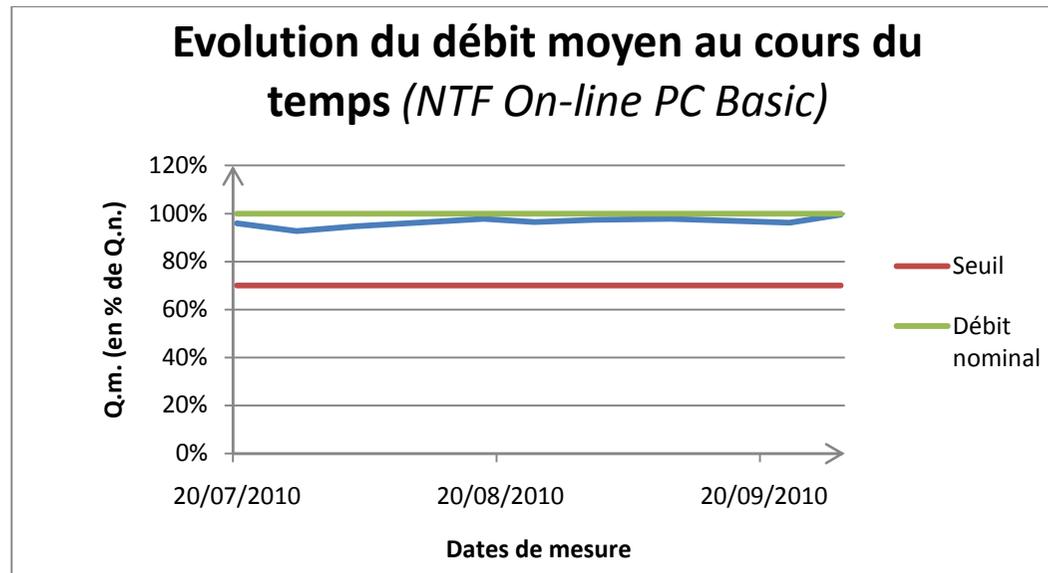
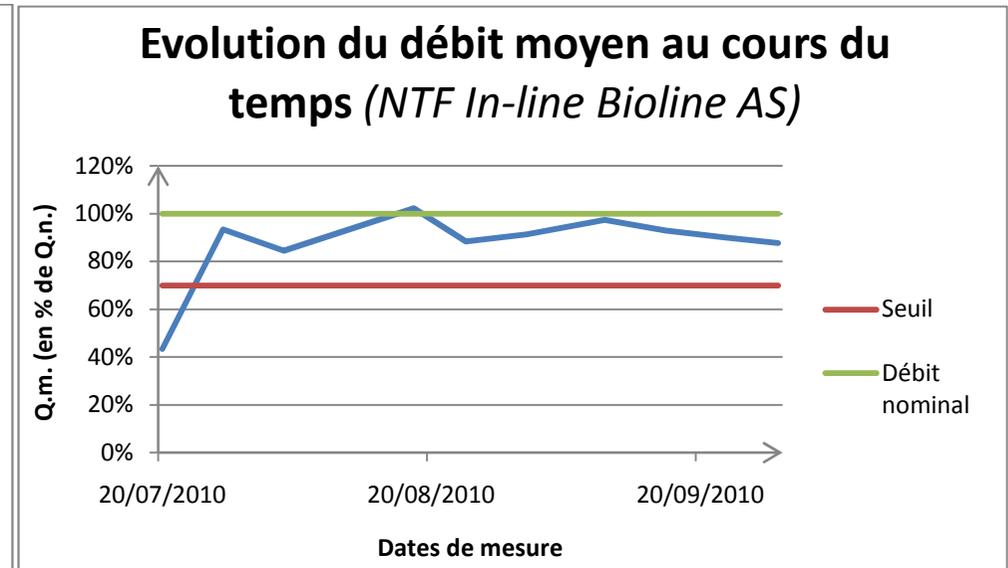
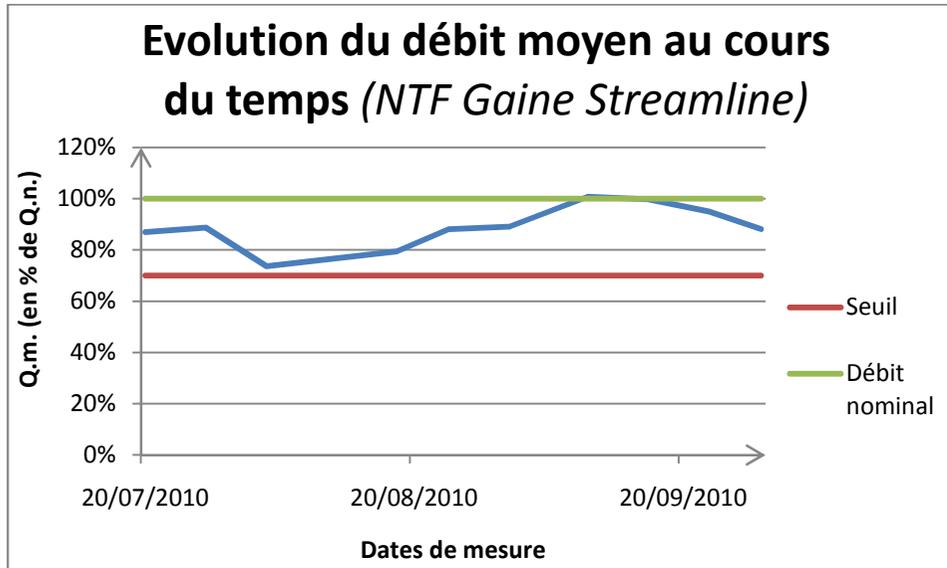


Evolution du débit moyen au cours du temps (NDJ On-line J-Turbo Key)

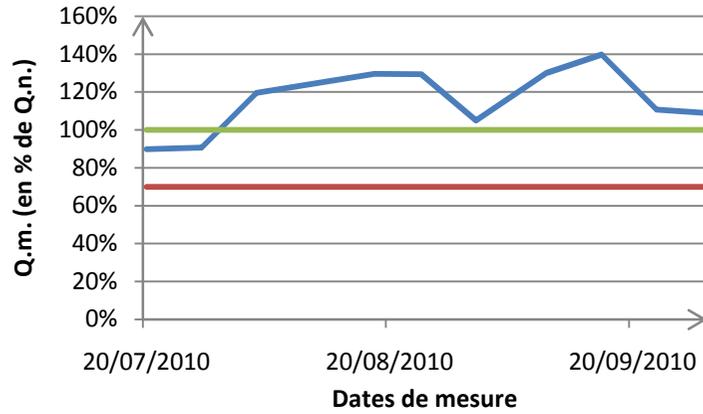


Représentations graphiques des débits moyens des différentes lignes testées sur le site de Fuveau.

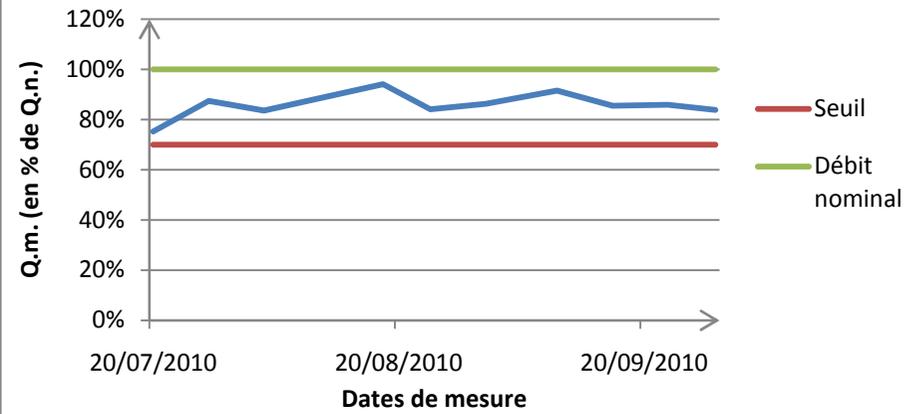




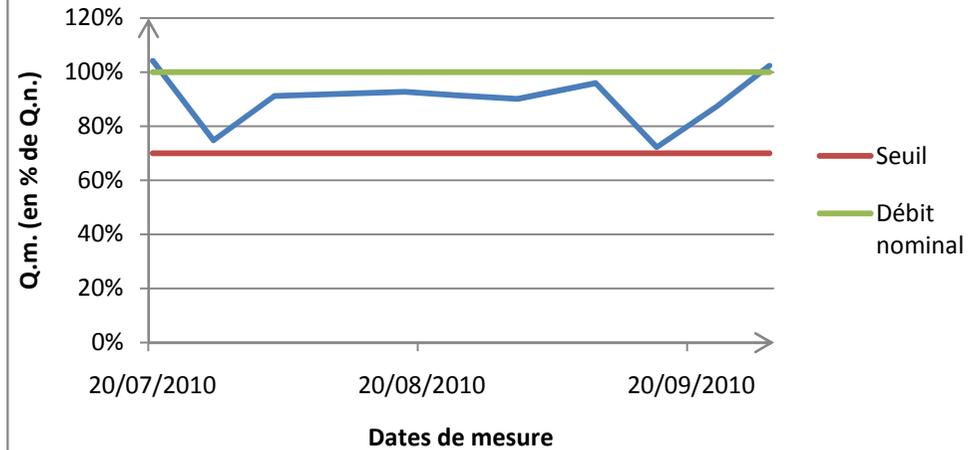
Evolution du débit moyen au cours du temps (NDJ Gaine Tape)



Evolution du débit moyen au cours du temps (NDJ In-line J-Turbo Aqura)

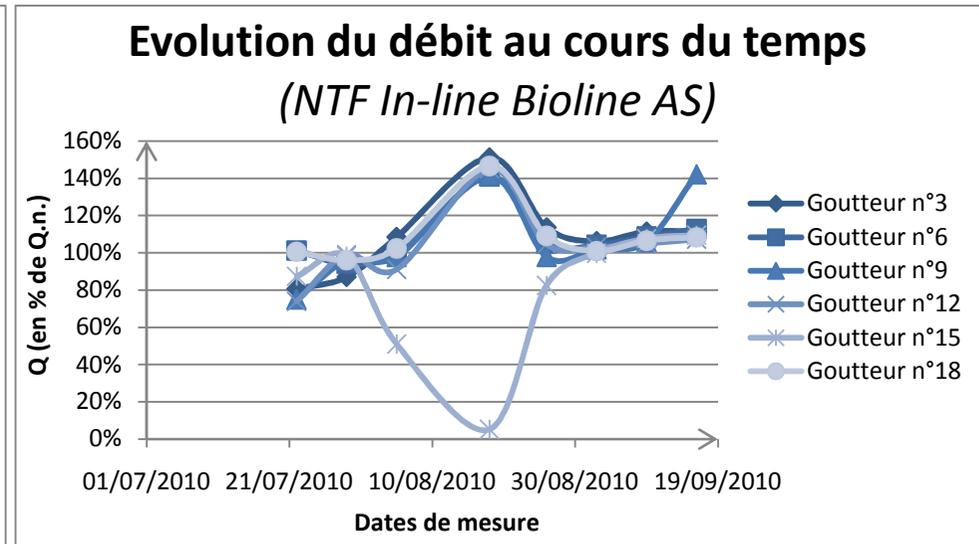
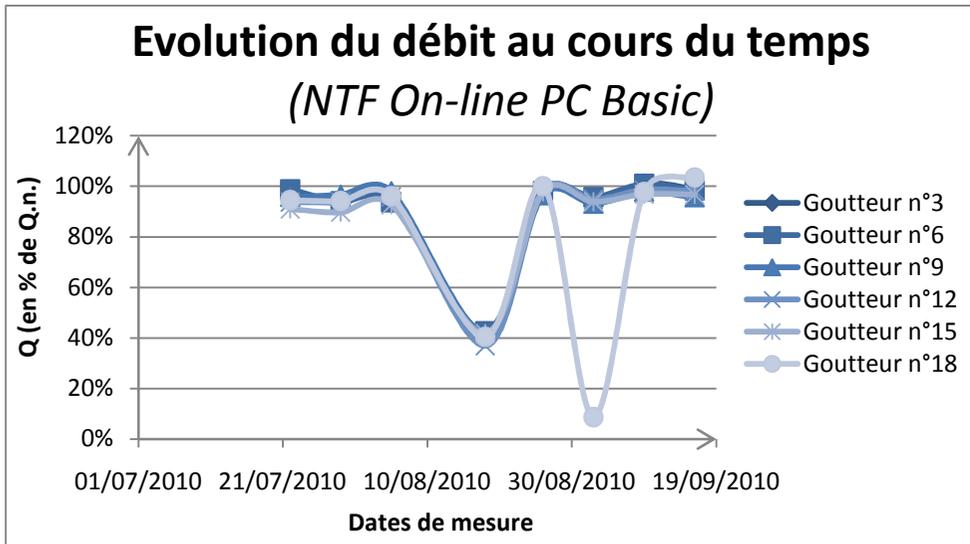
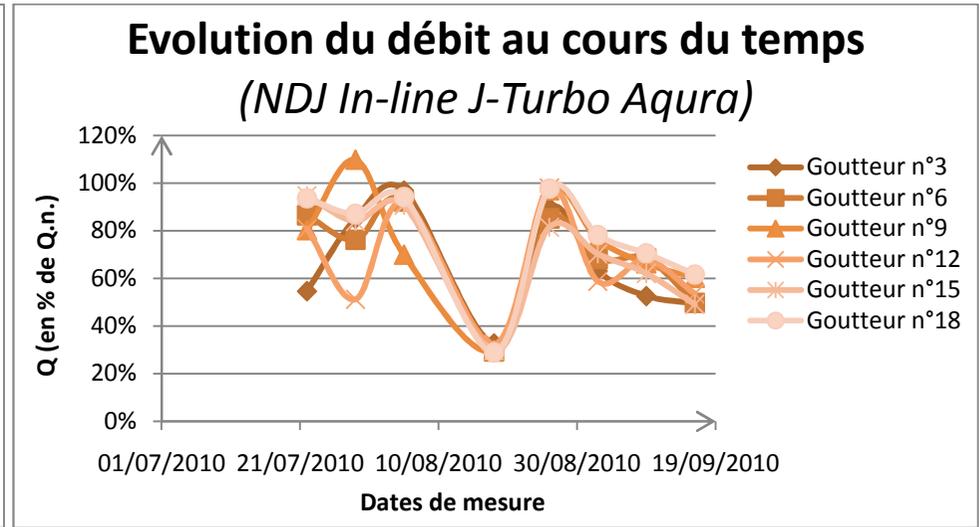
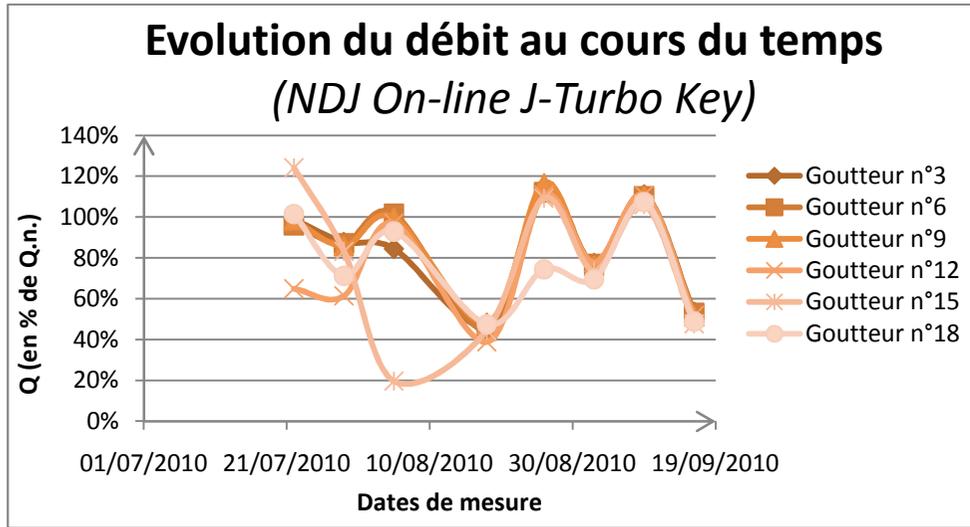


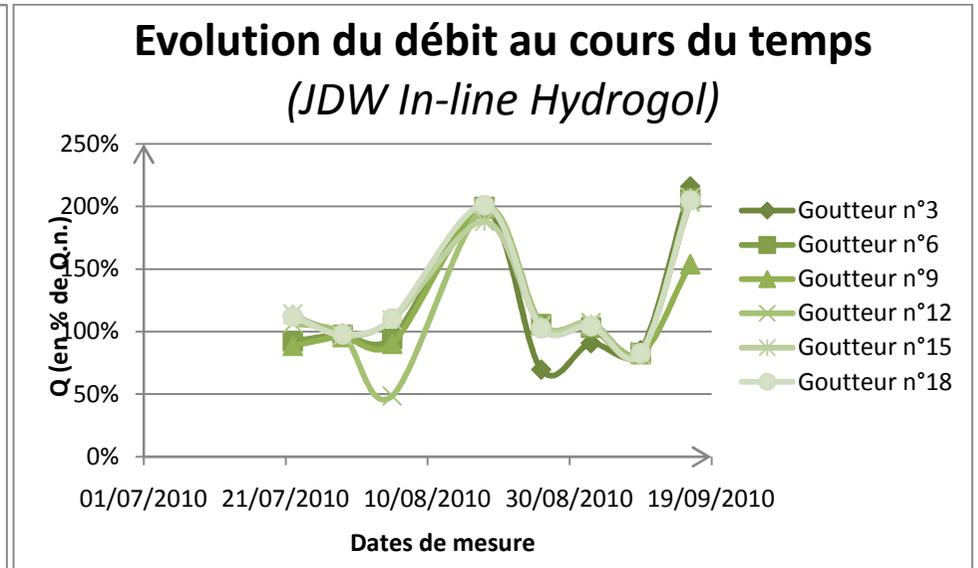
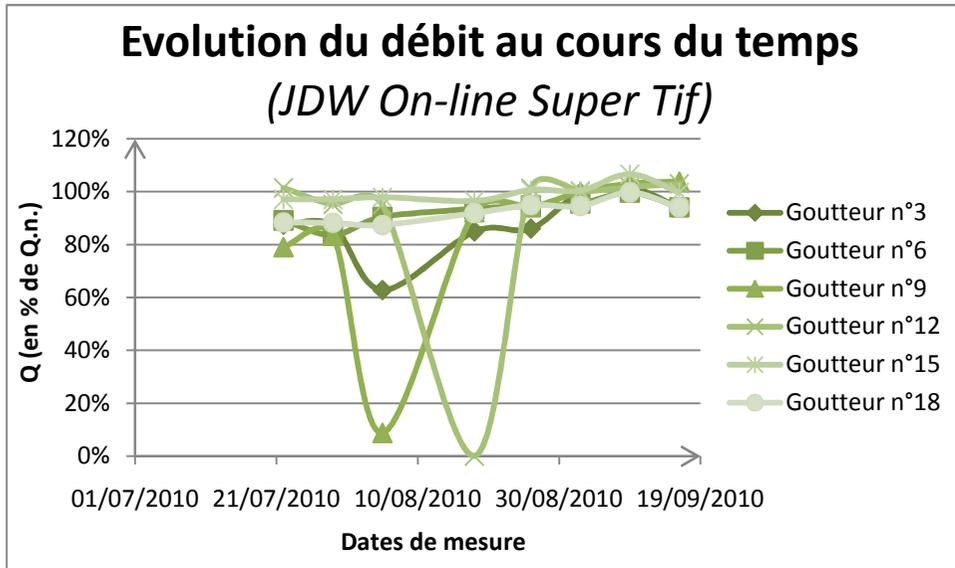
Evolution du débit moyen au cours du temps (NDJ On-line J-Turbo Key)



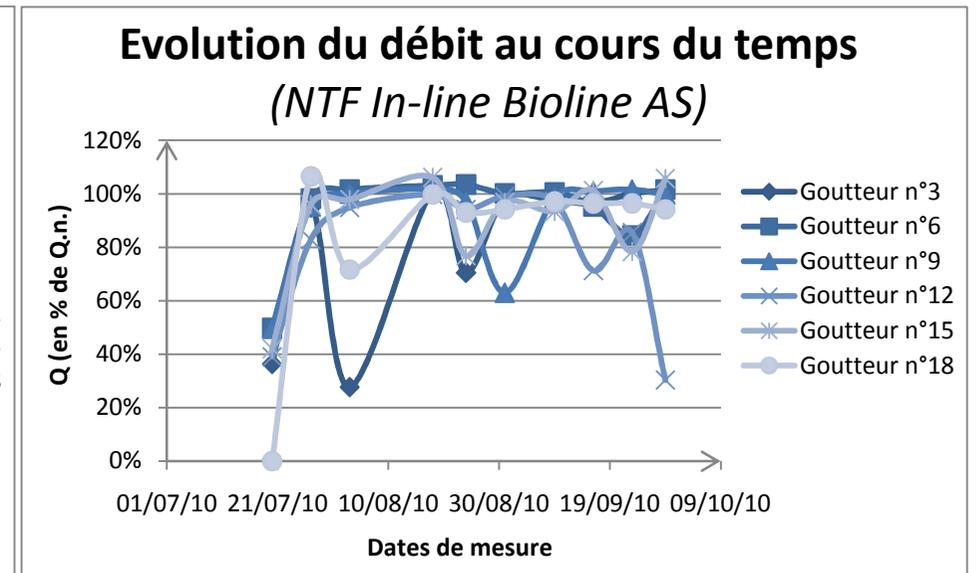
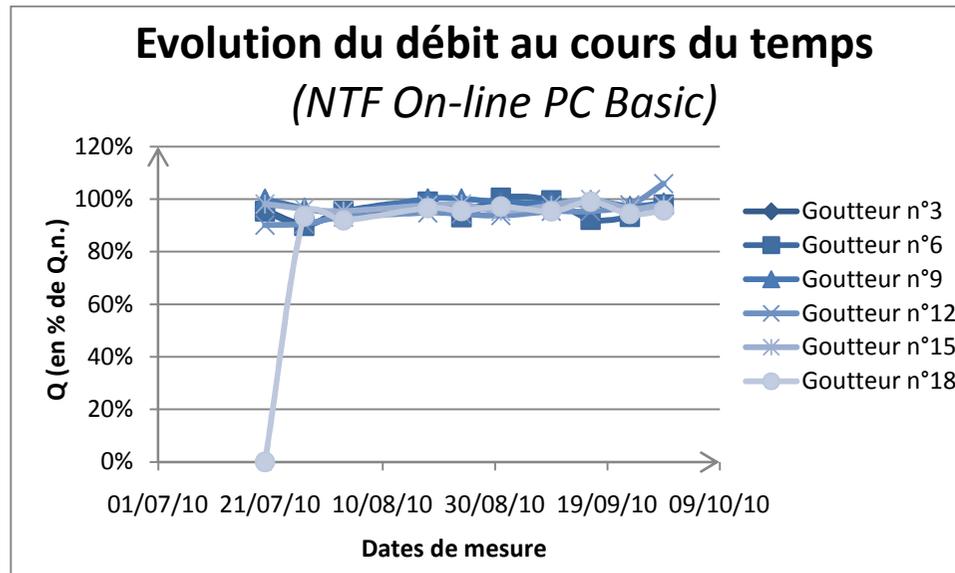
Annexe 41 : Présentation des débits des différents goutteurs de chacune des lignes testées sur les sites de Fuveau et de Bouc-Bel-Air.

Représentations graphiques des débits des différents goutteurs échantillonnés sur le site de Bouc-Bel-Air.

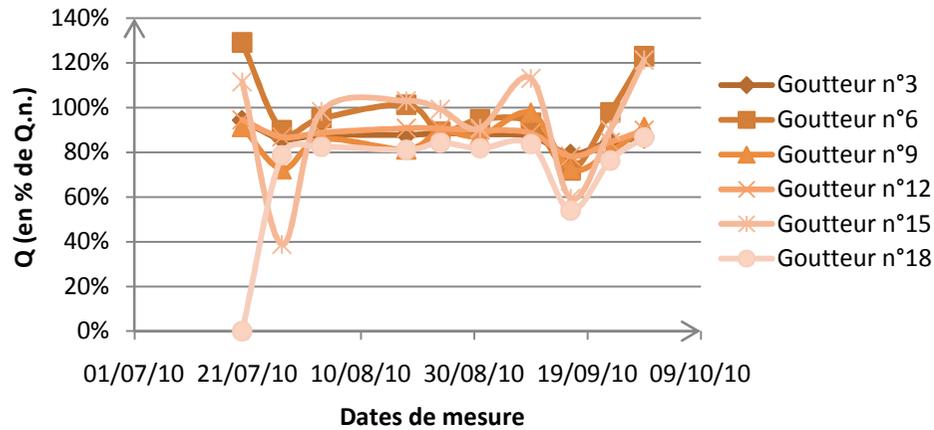




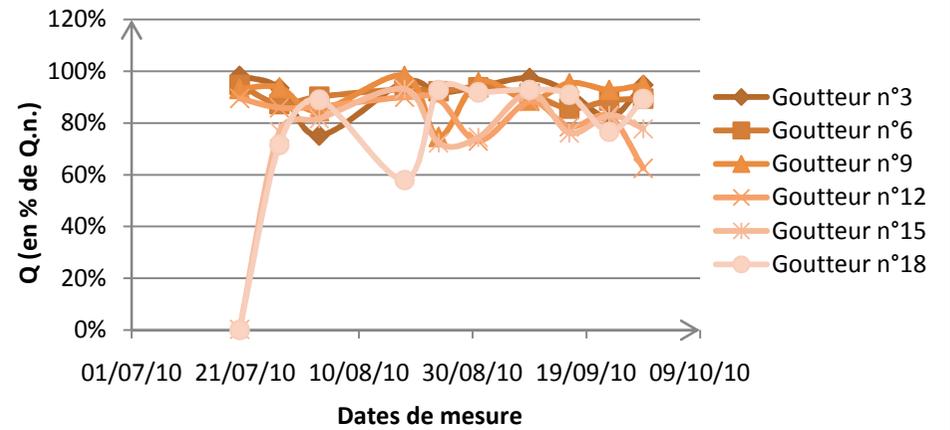
Représentations graphiques des débits des différents goutteurs échantillonnés sur le site de Fuveau.



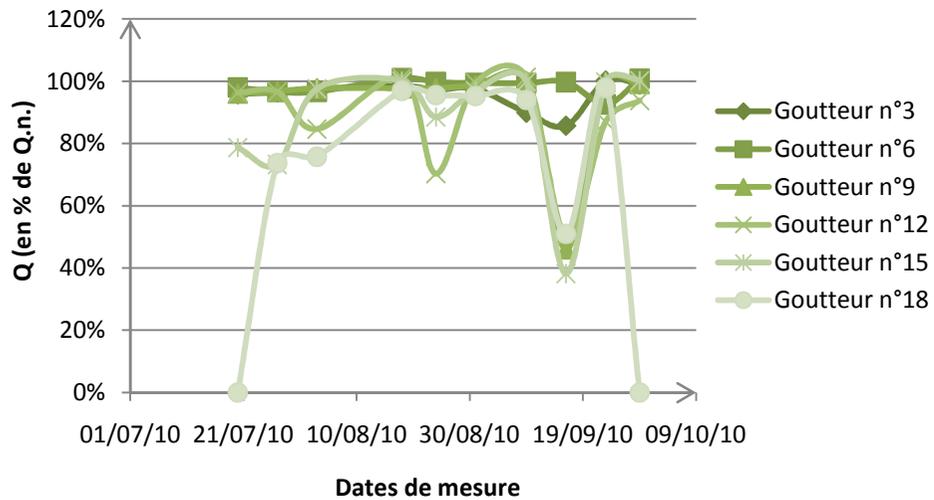
Evolution du débit au cours du temps
(NDJ On-line J-Turbo Key)



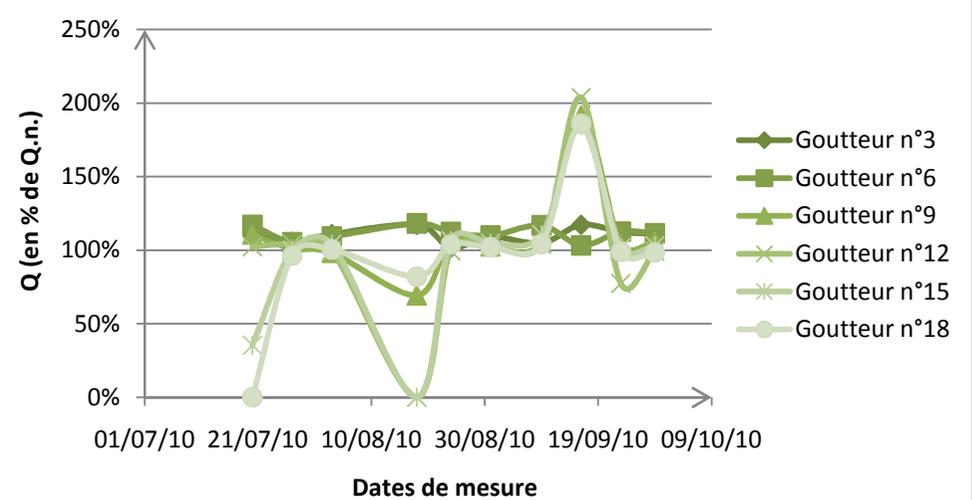
Evolution du débit au cours du temps
(NDJ In-line J-Turbo Aqura)



Evolution du débit au cours du temps
(JDW On-line Super Tif)



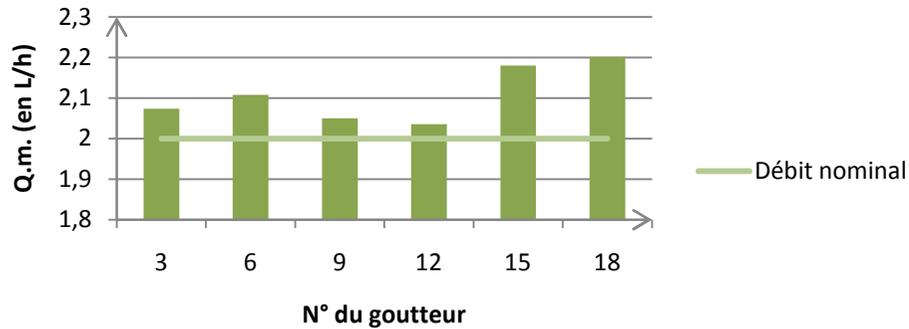
Evolution du débit au cours du temps
(JDW In-line Hydrogol)



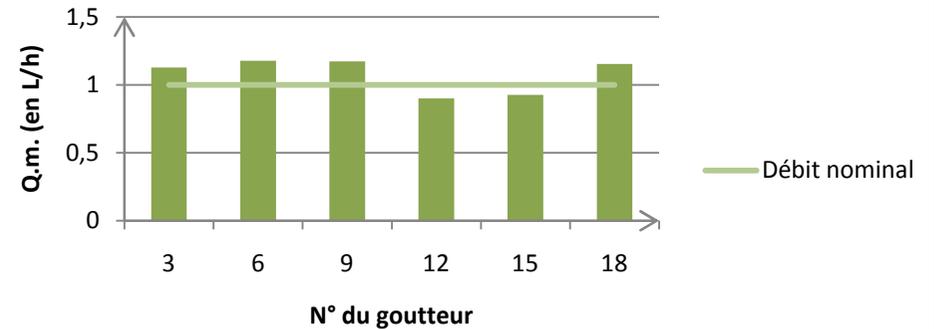
Annexe 42 : Evolution des débits moyens en fonction de la position du goutteur.

Représentations graphiques des débits moyens en fonction de la position des goutteurs pour le site de Bouc-Bel-Air.

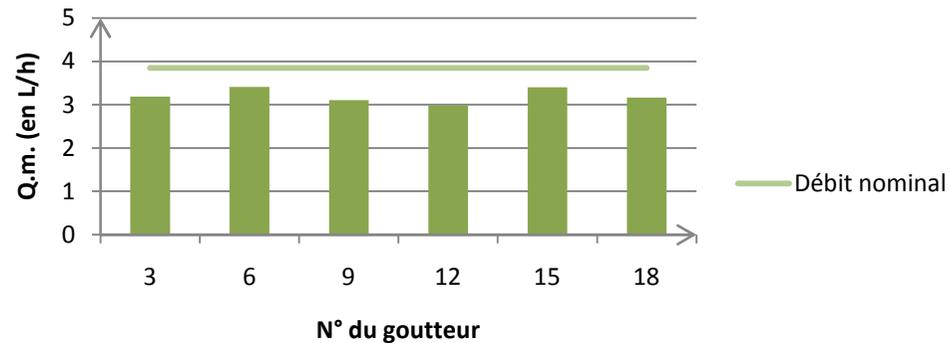
Evolution de Q.m. en fonction de la position du goutteur
(JDW In-line Hydrogol)



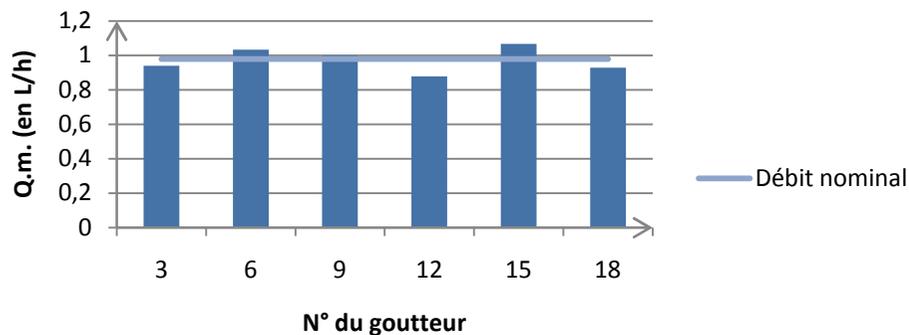
Evolution du Q.m. en fonction de la position du goutteur
(JDW Gaine T-Tape)



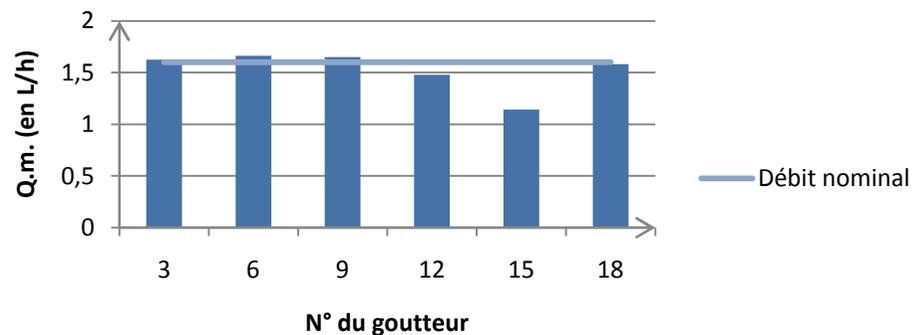
Evolution de Q.m. en fonction de la position du goutteur
(JDW On-line Super Tif)



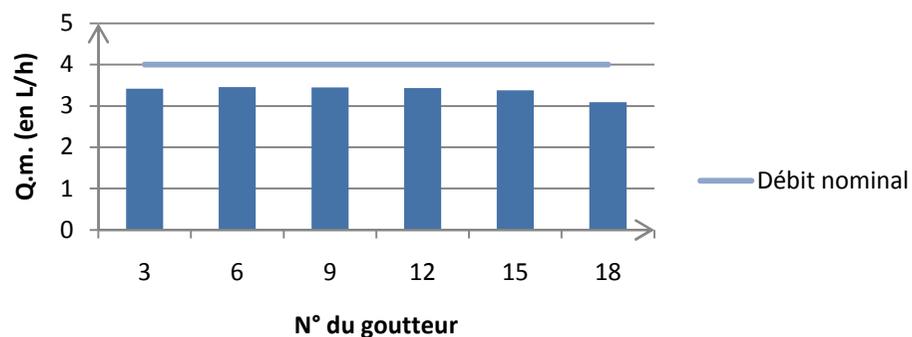
Evolution de Q.m. en fonction de la position du goutteur (NTF Gaine Streamline)



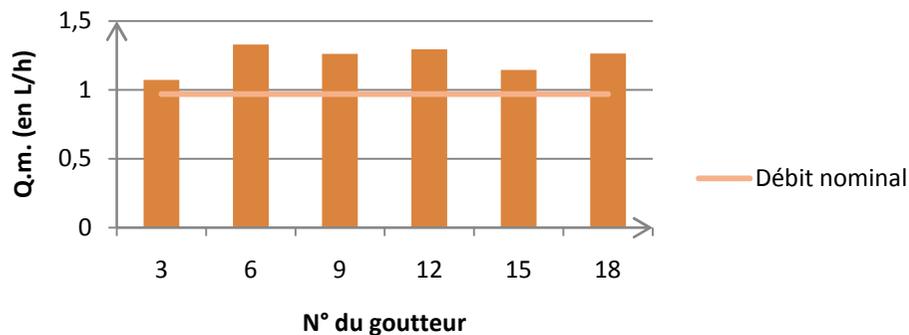
Evolution de Q.m. en fonction de la position du goutteur (NTF In-line Bioline AS)



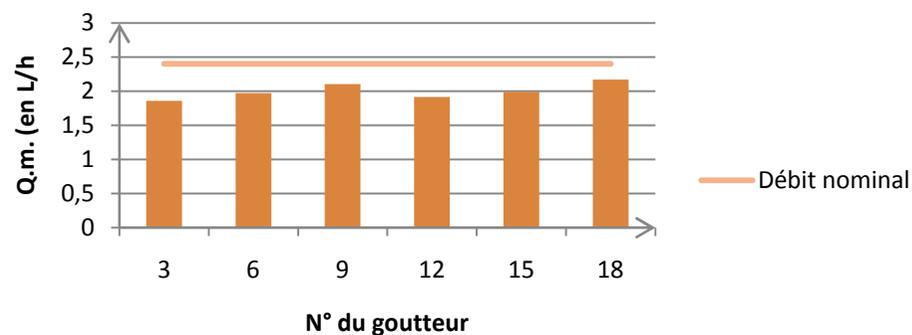
Evolution de Q.m. en fonction de la position du goutteur (NTF On-line PC Basic)



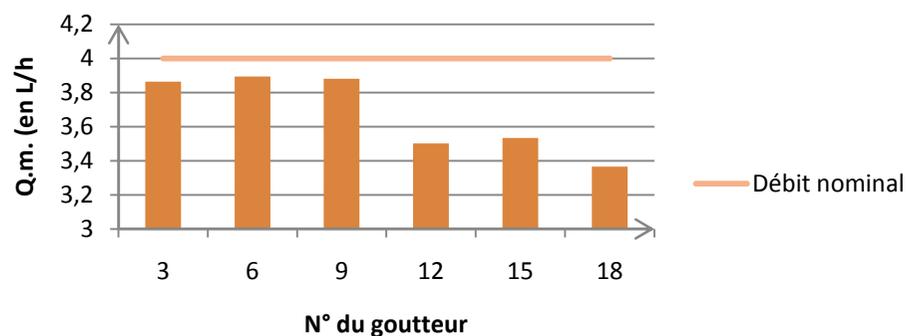
Evolution de Q.m. en fonction de la position du goutteur (NDJ Gaine Tape)



Evolution de Q.m. en fonction de la position du goutteur (NDJ In-line J-Turbo Aqura)

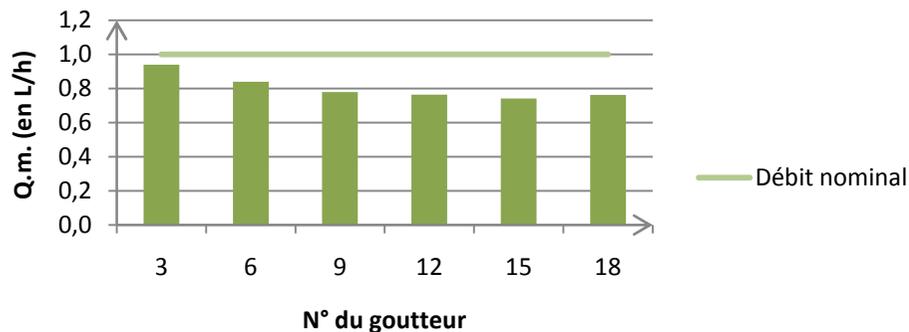


Evolution de Q.m. en fonction de la position du goutteur (NDJ On-line J-Turbo Key)

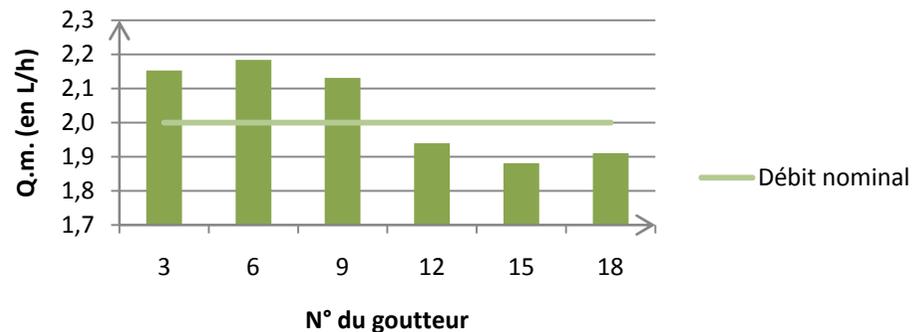


Représentations graphiques des débits moyens en fonction de la position des goutteurs pour le site de Fuveau.

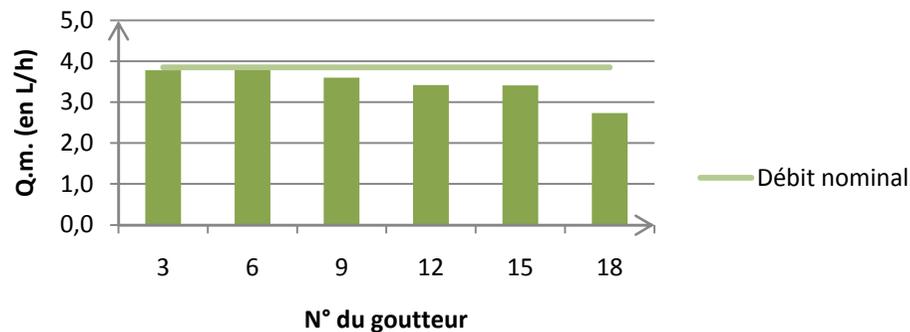
Evolution du Q.m. en fonction de la position du goutteur
(JDW Gaine T-Tape)



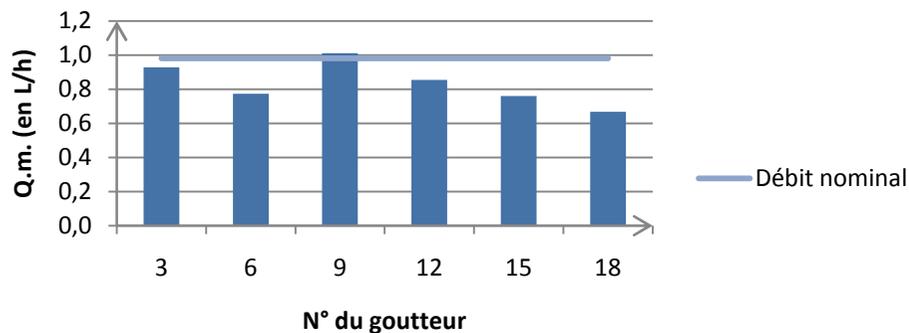
Evolution du Q.m. en fonction de la position du goutteur
(JDW In-line Hydrogol)



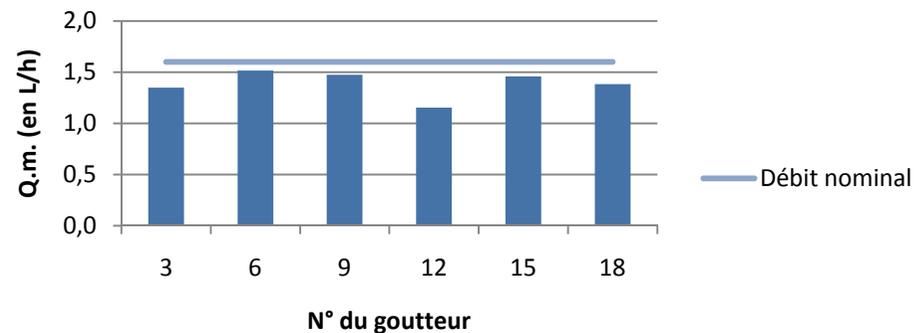
Evolution du Q.m. en fonction de la position du goutteur
(JDW On-line Super Tif)



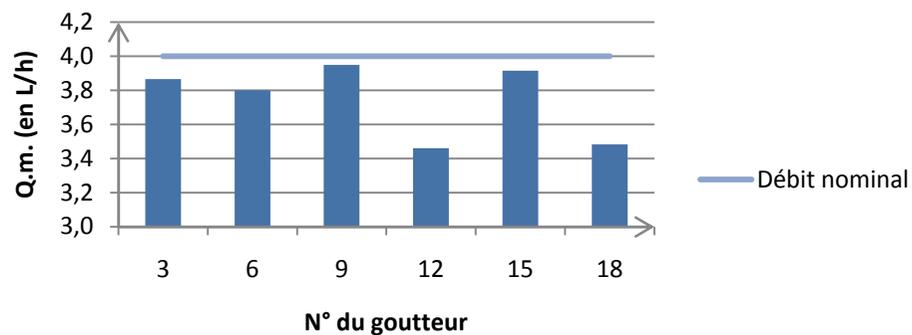
Evolution du Q.m. en fonction de la position du goutteur (NTF Gaine Streamline)



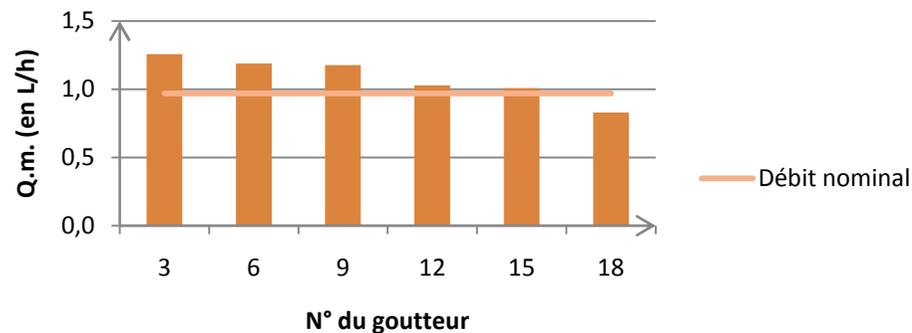
Evolution du Q.m. en fonction de la position du goutteur (NTF In-line Bioline AS)



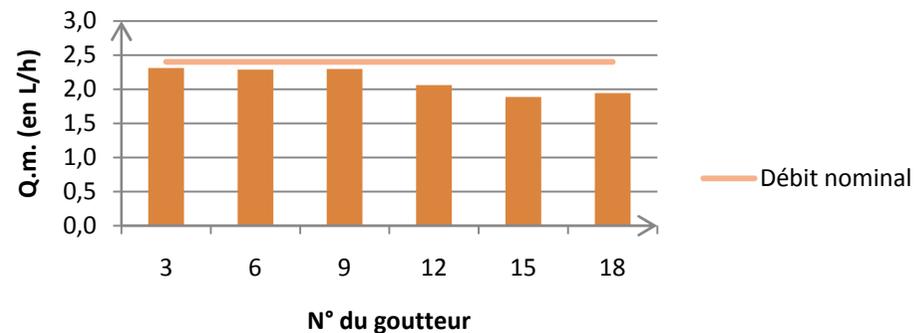
Evolution du Q.m. en fonction de la position du goutteur (NTF On-line PC Basic)



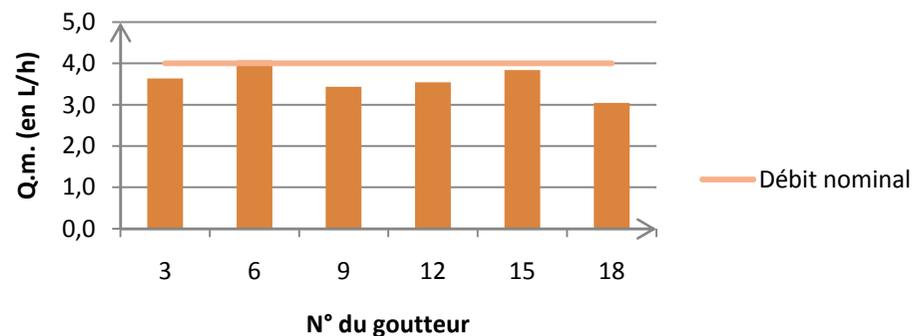
Evolution du Q.m. en fonction de la position du goutteur (NDJ Gaine Tape)



Evolution du Q.m. en fonction de la position du goutteur (NDJ In-line J-Turbo Aqura)

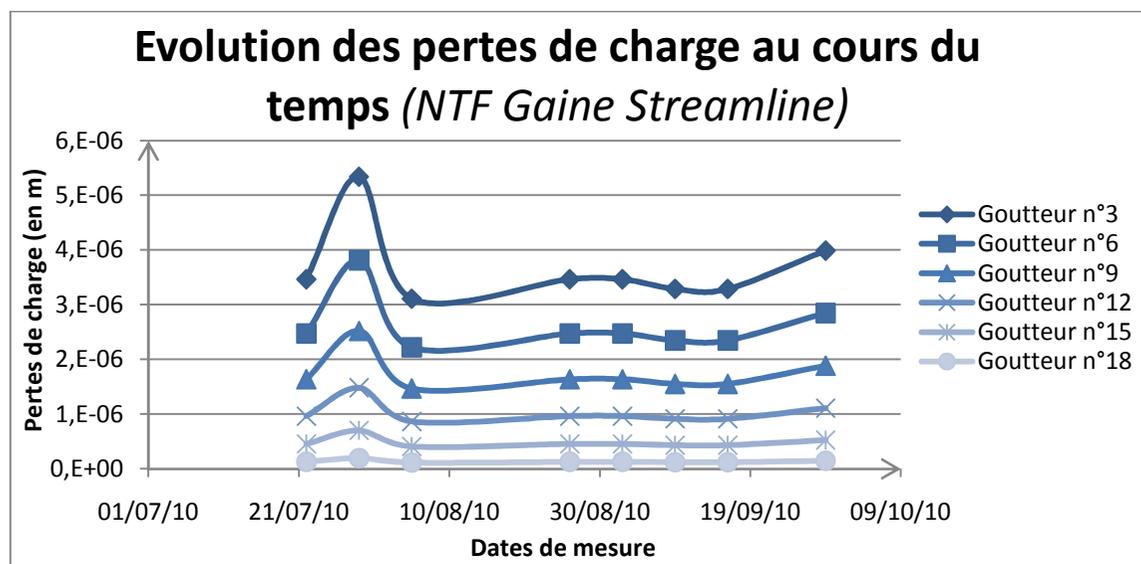
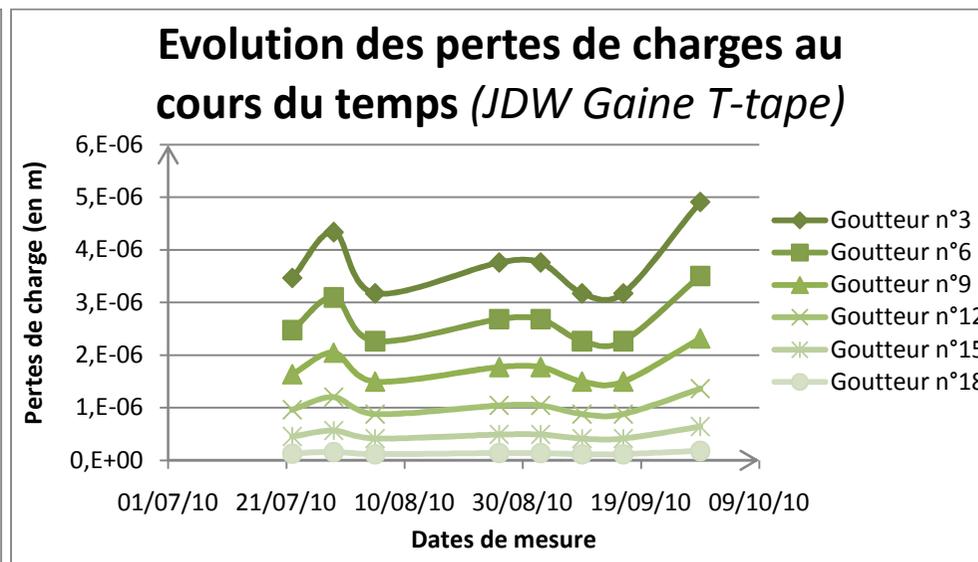
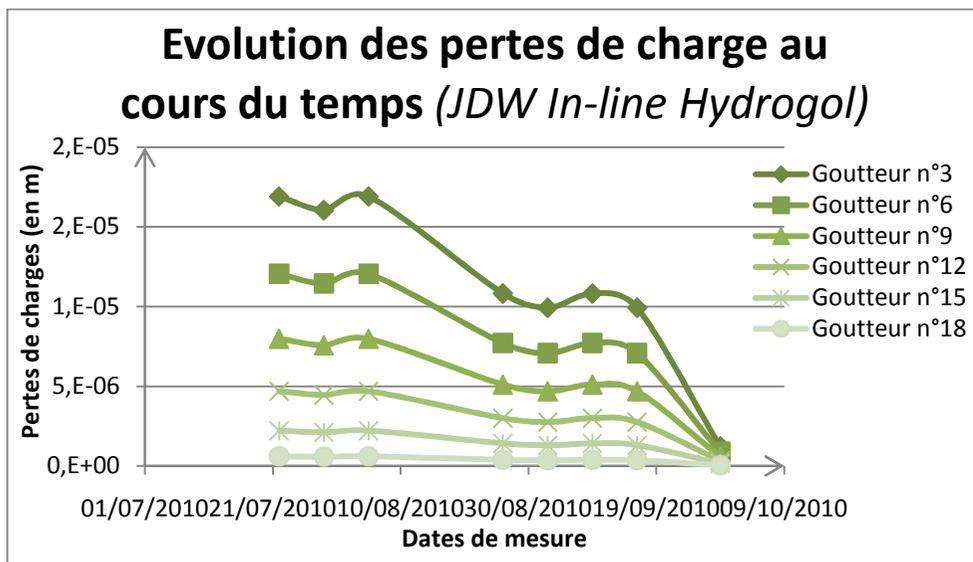


Evolution du Q.m. en fonction de la position du goutteur (NDJ On-line J-Turbo Key)

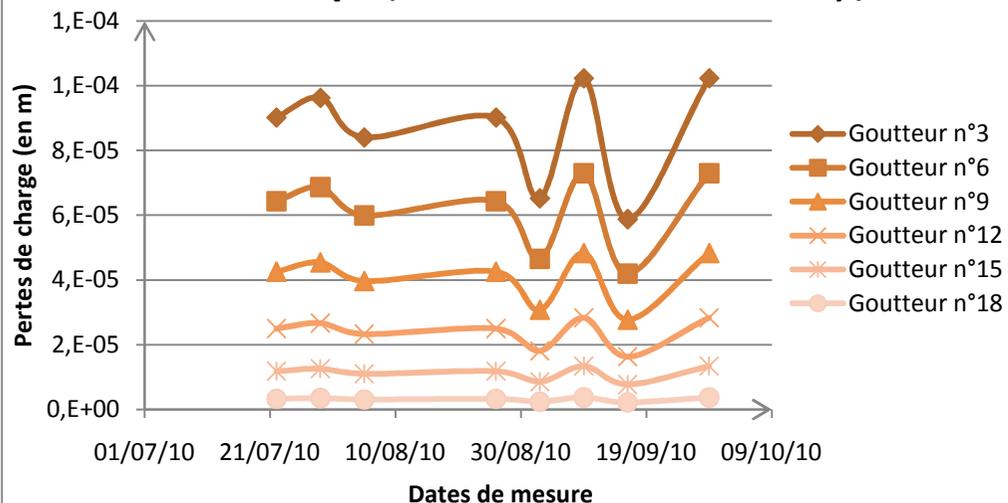


Annexe 43 : Evolution des pertes de charges le long des différentes lignes testées.

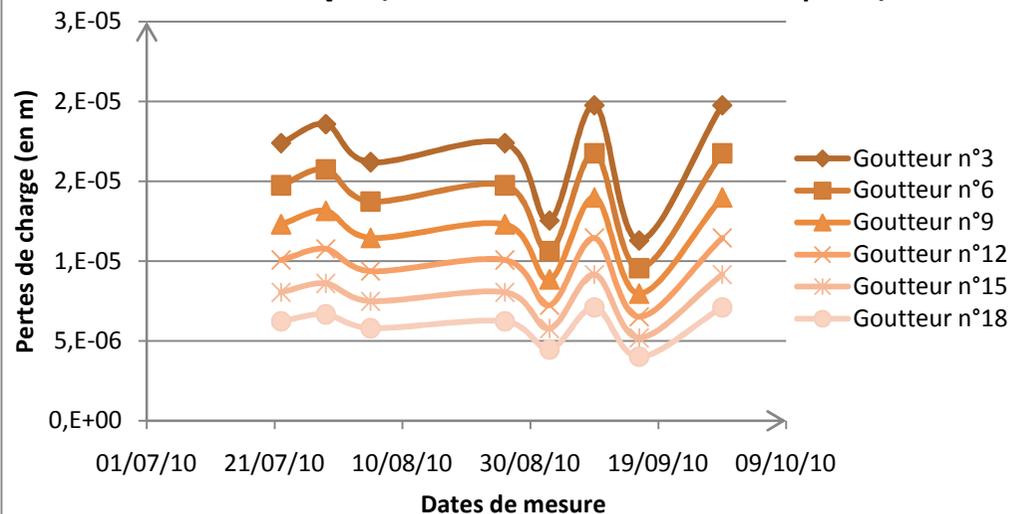
Représentations graphiques des pertes de charges pour le site de Bouc-Bel-Air.



Evolution des pertes de charge au cours du temps (NDJ On-line J-Turbo Key)

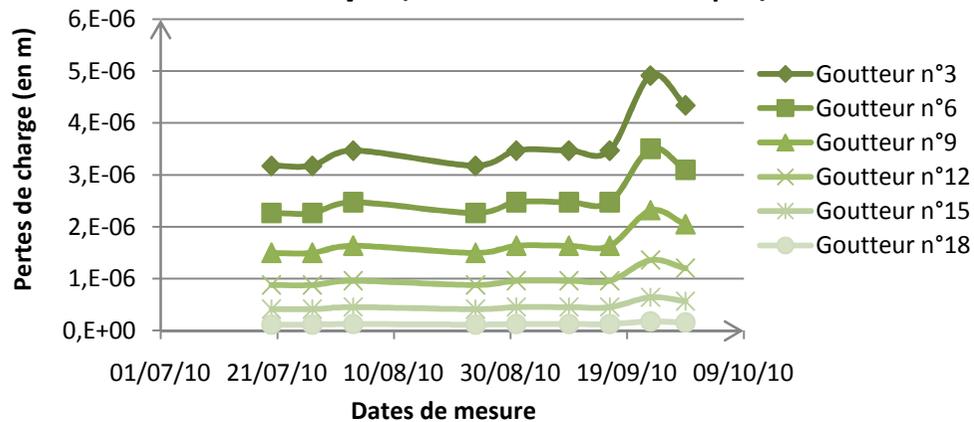


Evolution des pertes de charge au cours du temps (NDJ In-line J-Turbo Aqura)

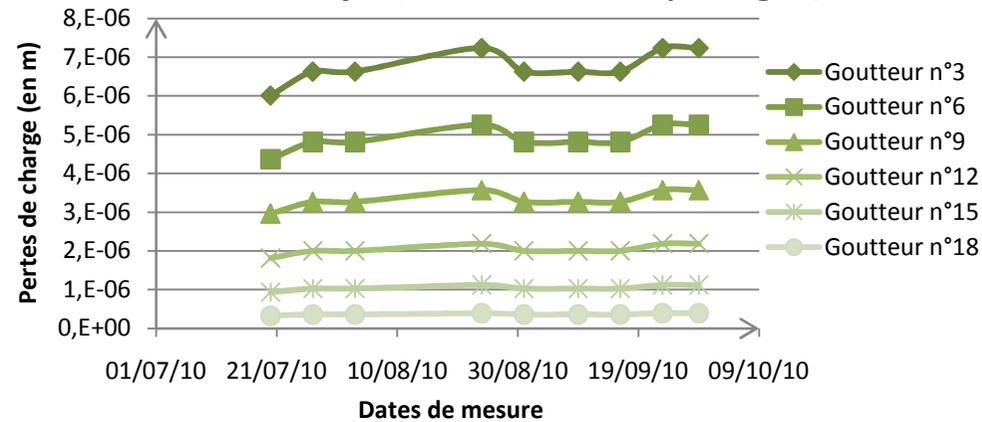


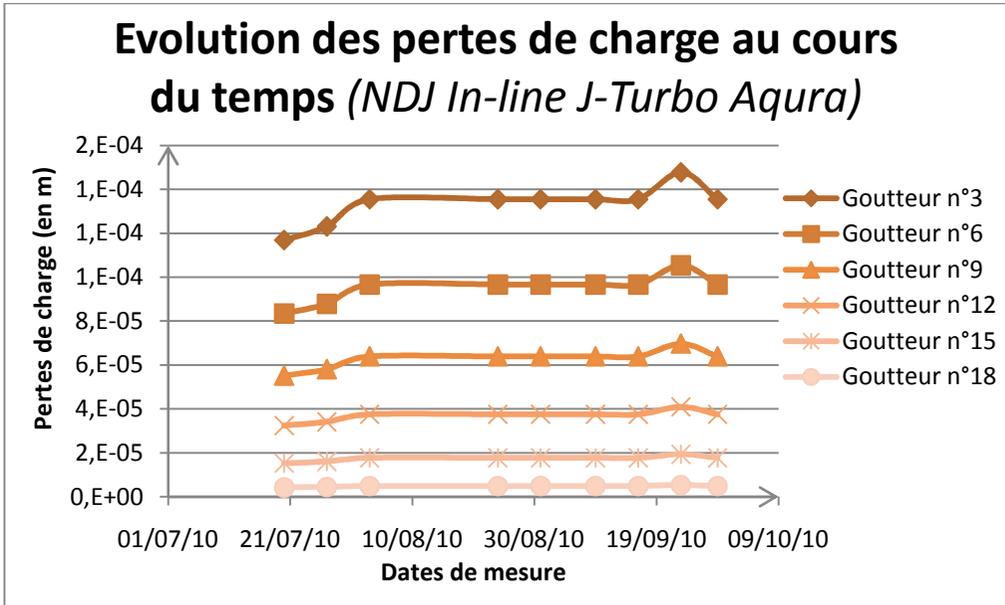
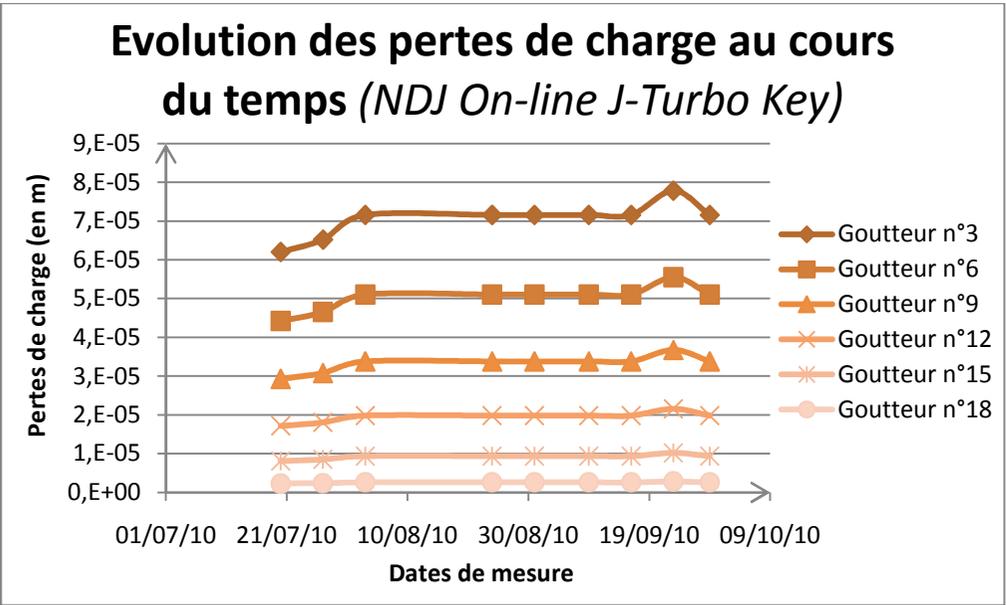
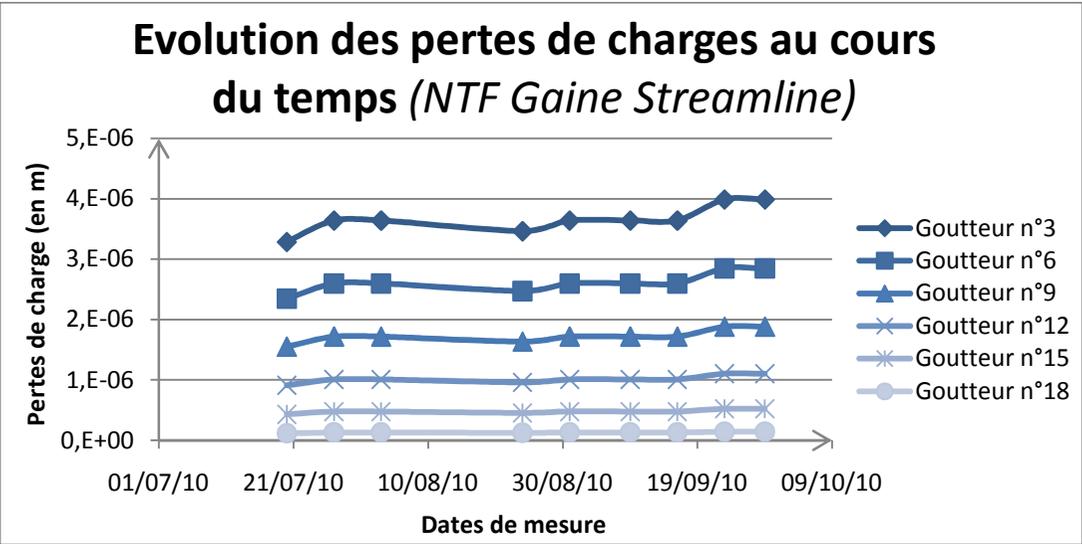
Représentations graphiques des pertes de charges pour le site de Bouc-Bel-Air.

Evolution des pertes de charge au cours du temps (JDW Gaine T-tape)



Evolution des pertes de charge au cours du temps (JDW In-line Hydrogol)





Annexe 44 : Evolution de des variations de pression au cours du temps.

Dates	Filtration 100 µm															Filtration 130 µm													
	Ligne n°1			Ligne n°2			Ligne n°3			Ligne n°4			Ligne n°5			Ligne n°6			Ligne n°7			Ligne n°8			Ligne n°9				
	Pe	Ps	ΔP	Pe	Ps	ΔP	Pe	Ps	ΔP	Pe	Ps	ΔP	Pe	Ps	ΔP	Pe	Ps	ΔP	Pe	Ps	ΔP	Pe	Ps	ΔP	Pe	Ps	ΔP	Pe	Ps
22/07/2010	Pas de manomètre en entrée	0,55	?	Pas de manomètre en entrée	0,85	?	1,4	1,3	0,1	1,4	1,3	0,1	1,4	1,3	0,1	1,8	1,8	0	1,8	1,8	0	1,8	1,8	0	3	2	1		
29/07/2010		0,7			1,4		1,5	1,4	0,1	1,5	1,4	0,1	1,5	1,4	0,1	1,8	1,7	0,1	1,8	1,7	0,1	1,8	1,7	0,1	2,5	2,4	0,1		
05/08/2010		0,5			0,75		1,2	1,2	0	1,2	1,2	0	1,2	1,2	0	1,8	1,8	0	1,8	1,8	0	1,8	1,8	0	2	2	0		
26/08/2010		0,6			0,85		1,5	1,3	0,2	1,5	1,3	0,2	1,5	1,3	0,2	1,2	1,1	0,1	1,2	1,1	0,1	1,2	1,1	0,1	1,8	1,7	0,1		
02/09/2010		0,6			0,85		1	0,9	0,1	1	0,9	0,1	1	0,9	0,1	1,1	1	0,1	1,1	1	0,1	1,1	1	0,1	1,7	1,5	0,2		
09/09/2010		0,5			0,8		1,6	1,5	0,1	1,6	1,5	0,1	1,6	1,5	0,1	1,2	1,1	0,1	1,2	1,1	0,1	1,2	1,1	0,1	1,9	1,7	0,2		
16/09/2010		0,5			0,8		0,9	0,8	0,1	0,9	0,8	0,1	0,9	0,8	0,1	1,1	1	0,1	1,1	1	0,1	1,1	1	0,1	1,5	1,3	0,2		
29/09/2010		0,8			1		1,7	1,5	0,2	1,7	1,5	0,2	1,7	1,5	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1		

Evolution de ΔP pour les différentes lignes du site de Bouc-Bel-Air.

Dates	Filtration 100 µm															Filtration 130 µm														
	Ligne n°1			Ligne n°2			Ligne n°3			Ligne n°4			Ligne n°5			Ligne n°6			Ligne n°7			Ligne n°8			Ligne n°9					
	Pe	Ps	ΔP	Pe	Ps	ΔP	Pe	Ps	ΔP	Pe	Ps	ΔP	Pe	Ps	ΔP	Pe	Ps	ΔP	Pe	Ps	ΔP	Pe	Ps	ΔP	Pe	Ps	ΔP	Pe	Ps	ΔP
20/07/2010	Pas de manomètre en entrée	0,5	?	Pas de manomètre en entrée	0,8	?	1	0,9	0,15	1	0,9	0,15	1	0,9	0,15	1,15	0,9	0,25	1,15	0,9	0,25	1,15	0,9	0,25	1,9	1,7	0,2			
27/07/2010		0,5			0,9		1,1	0,9	0,2	1,1	0,9	0,2	1,1	0,9	0,2	1,2	1	0,2	1,2	1	0,2	1,2	1	0,2	1,7	1,5	0,2			
03/08/2010		0,55			0,9		1,1	1	0,1	1,1	1	0,1	1,1	1	0,1	1,2	1	0,2	1,2	1	0,2	1,2	1	0,2	1,9	1,7	0,2			
18/08/2010					1,05		1,1	1	0,1	1,1	1	0,1	1,1	1	0,1	1,1	0,95	0,15	1,1	0,95	0,15	1,1	0,95	0,15	1,85	1,55	0,3			
24/08/2010		0,5			0,85		1,1	1	0,1	1,1	1	0,1	1,1	1	0,1	1,2	1,1	0,1	1,2	1,1	0,1	1,2	1,1	0,1	1,8	1,7	0,1			
31/08/2010		0,55			0,9		1,1	1	0,1	1,1	1	0,1	1,1	1	0,1	1,2	1	0,2	1,2	1	0,2	1,2	1	0,2	1,9	1,75	0,2			
09/09/2010		0,55			0,9		1,1	1	0,1	1,1	1	0,1	1,1	1	0,1	1,1	1	0,1	1,1	1	0,1	1,1	1	0,1	1,9	1,7	0,2			
16/09/2010		0,55			0,9		1,1	1	0,1	1,1	1	0,1	1,1	1	0,1	1,1	1	0,1	1,1	1	0,1	1,1	1	0,1	1,9	1,7	0,2			
23/09/2010		0,8			1		1,2	1,1	0,1	1,2	1,1	0,1	1,2	1,1	0,1	1,2	1,1	0,1	1,2	1,1	0,1	1,2	1,1	0,1	1,2	1,1	0,1	1,9	1,7	0,2
29/09/2010		0,7			1		1,1	1	0,1	1,1	1	0,1	1,1	1	0,1	1,2	1,1	0,1	1,2	1,1	0,1	1,2	1,1	0,1	1,2	1,1	0,1	1,9	1,7	0,2

Evolution de ΔP pour les différentes lignes du site de Fuveau.

Annexe 45 : Tableau récapitulatif de certains résultats obtenus sur le site de Fuveau.

	07/07	20/07	27/07	03/08	18/08	24/08	31/08	09/09	16/09	23/09	29/09	07/10	14/10	21/10	28/10
Compteur 1-5	2911,7	9833	18040	26893	46245	54315	61450	73070	76638	77842	78658	79543	80316	80721	80932
Compteur 6-8	2757,1	6031	12415	18460	32227	37240	41503	49516	56277	61778	67400	74886	80994	86070	91353
Compteur 9	1291,4	2388	4474	6465	11010	12660	14065	16724	18970	20799	23053	26129	28821	30873	32959
Nombre de jours		13	7	7	15	6	7	9	7	7	6	9	7	7	7
Temps fonctionnement (h)		13	20	27	42	48	55	64	71	78	84	93	100	107	114
Volume/heure 1-5			410,4	1264,7	1290,1	1345,0	1019,3	1291,1	509,7	172,0	136,0	98,3	110,4	57,9	80932,0
Volume/heure 6-8			319,2	863,6	917,8	835,5	609,0	890,3	965,9	785,9	937,0	831,8	872,6	725,1	91353,0
Volume/heure 9			104,3	284,4	303,0	275,0	200,7	295,4	320,9	261,3	375,7	341,8	384,6	293,1	32959,0

	Nombre	Débit moyen														
		07/07	20/07	27/07	03/08	18/08	24/08	31/08	09/09	16/09	23/09	29/09	07/10	14/10	21/10	28/10
1-JDW T-Tape	127		0,94	0,50	0,79	0,98	0,91	0,92	0,92	1,15	0,92	0,97	0,77	0,72	0,96	0,82
2- NTF Streamline	127	0,77	0,80	0,85	0,62	0,79	0,84	0,86	0,96	0,98	0,90	0,86	0,93	1,01	0,89	1,02
3-NDJ Tape	127	1,26	0,72	0,91	1,04	1,17	1,23	1,04	1,25	1,31	1,08	0,88	1,22	1,04	1,19	1,19
4-NDJ Turbo Aqura InL	127	2,34	1,93	2,13	2,13	2,21	2,15	2,19	2,31	2,17	2,21	2,13	1,92	2,15	2,28	2,17
5-NDJ Turbo Key OnL	76	3,35	4,37	3,15	3,74	3,79	3,76	3,70	3,92	2,89	3,72	4,16	4,10	3,47	3,68	3,34
6-NTF Bioline InL	127	1,58	0,62	1,53	1,32	1,63	1,43	1,47	1,56	1,50	1,46	1,42	1,29	1,76	1,56	1,55
7-NTF PC Basic OnL	76	4,00	3,84	3,72	3,77	3,90	3,85	3,90	3,90	3,89	3,84	3,96	4,61	3,96	3,88	3,65
8-JDW Hydrogol InL	127	2,28	1,92	2,02	2,05	1,22	2,08	2,08	2,04	3,11	2,00	2,07	2,17	1,94	2,12	2,25
9-JDW SuperTif OnL	72	3,91	3,57	3,42	3,53	3,82	3,52	3,77	3,75	2,38	3,70	3,16	3,18	3,85	3,62	2,96

	Coefficient de variations														
	07/07	20/07	27/07	03/08	18/08	24/08	31/08	09/09	16/09	23/09	29/09	07/10	14/10	21/10	28/10
1-JDW T-Tape		9,1%	93,2%	27,3%	11,3%	24,8%	14,2%	11,9%	13,8%	10,0%	5,1%	12,1%	12,2%	10,2%	7,2%
2- NTF Streamline	9,6%	26,0%	8,6%	75,1%	50,2%	19,3%	11,5%	9,3%	11,9%	13,5%	12,7%	8,1%	8,4%	12,4%	11,5%
3-NDJ Tape	7,0%	72,0%	30,4%	31,2%	18,6%	14,6%	16,8%	2,0%	16,2%	14,9%	53,7%	18,8%	4,1%	4,9%	3,2%
4-NDJ Turbo Aqura InL	9,1%	31,0%	10,6%	6,5%	17,0%	11,0%	12,0%	3,6%	9,0%	6,7%	14,8%	38,7%	8,0%	3,9%	9,2%
5-NDJ Turbo Key OnL	19,4%	42,7%	25,2%	6,6%	10,5%	5,5%	4,8%	11,3%	14,9%	8,8%	17,5%	19,1%	6,2%	6,6%	17,8%
6-NTF Bioline InL	24,5%	46,1%	7,9%	35,1%	2,4%	14,2%	15,5%	2,4%	12,0%	10,5%	32,5%	63,7%	7,2%	7,0%	13,2%
7-NTF PC Basic OnL	3,8%	3,1%	3,3%	1,5%	1,9%	2,7%	2,5%	1,7%	3,1%	1,8%	3,6%	1,5%	1,8%	2,0%	18,5%
8-JDW Hydrogol InL	25,1%	25,5%	3,6%	5,1%	83,0%	4,2%	3,3%	4,7%	26,0%	12,8%	5,4%	20,7%	24,7%	4,5%	22,5%
9-JDW SuperTif OnL	7,6%	7,9%	13,4%	10,2%	1,8%	12,1%	1,7%	4,6%	40,1%	5,5%	49,1%	49,0%	2,0%	5,4%	28,5%
Moyenne des CV obtenus sur l'ensemble des goutteurs	13,3%	29,3%	21,8%	22,1%	21,8%	12,1%	9,2%	5,7%	16,3%	9,4%	21,6%	25,7%	8,3%	6,3%	14,6%

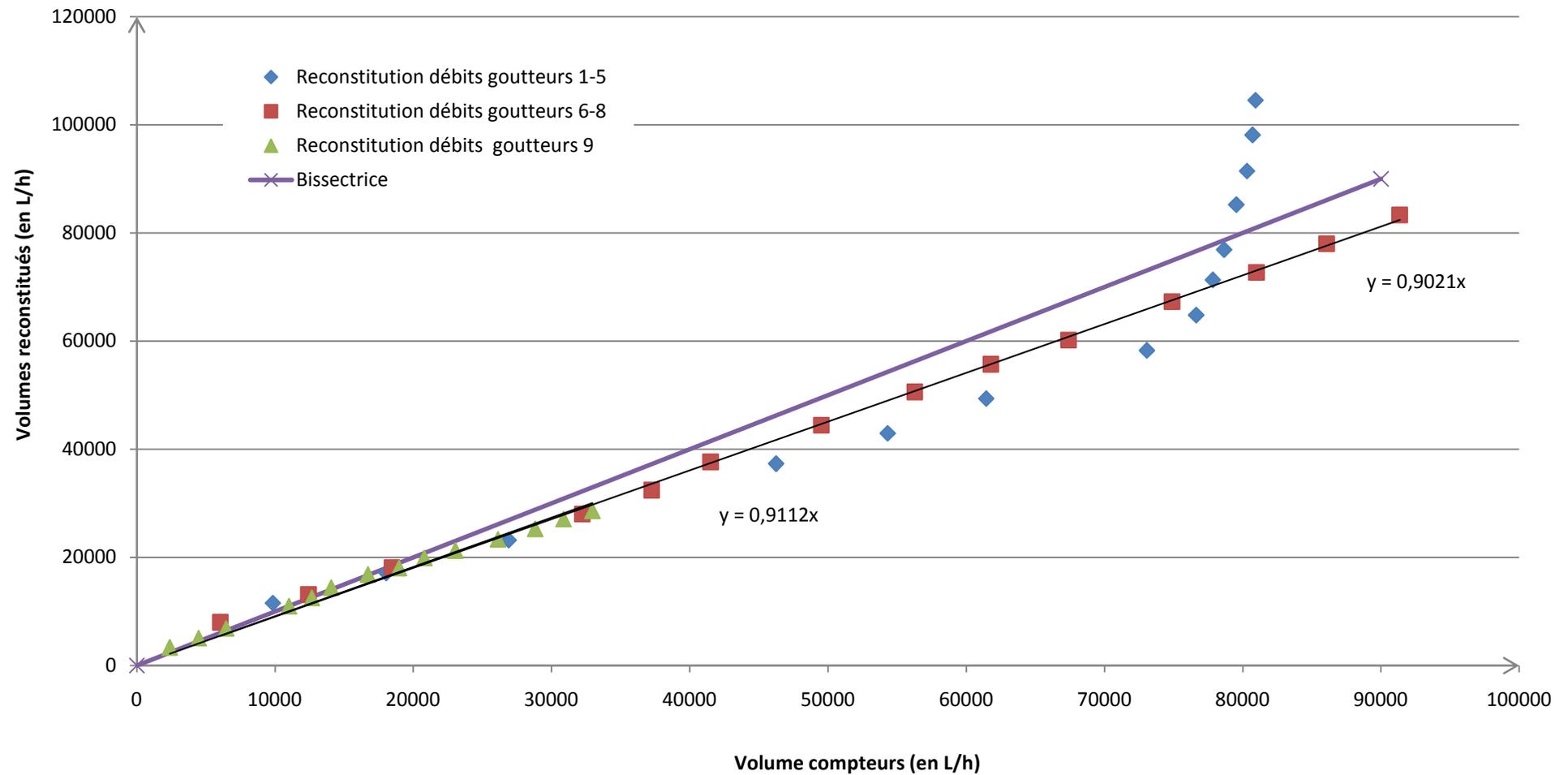
	Débit moyen mesuré en % du débit initial															
	Nombre	07/07	20/07	27/07	03/08	18/08	24/08	31/08	09/09	16/09	23/09	29/09	07/10	14/10	21/10	28/10
1-JDW T-Tape	127		100%	191%	119%	97%	104%	102%	102%	82%	103%	97%	122%	131%	99%	115%
2- NTF Streamline	127	100%	97%	91%	126%	98%	92%	90%	81%	79%	86%	90%	83%	77%	87%	76%
3-NDJ Tape	127	100%	175%	138%	122%	108%	102%	122%	101%	96%	117%	143%	104%	122%	106%	106%
4-NDJ Turbo Aqura InL	127	100%	121%	110%	110%	106%	109%	107%	101%	108%	106%	110%	122%	109%	103%	108%
5-NDJ Turbo Key OnL	76	100%	77%	106%	89%	88%	89%	90%	85%	116%	90%	80%	82%	96%	91%	100%
6-NTF Bioline InL	127	100%	255%	103%	120%	97%	111%	108%	101%	105%	108%	111%	122%	90%	101%	102%
7-NTF PC Basic OnL	76	100%	104%	108%	106%	102%	104%	103%	103%	103%	104%	101%	87%	101%	103%	110%
8-JDW Hydrogol InL	127	100%	119%	113%	111%	187%	110%	110%	112%	73%	114%	110%	105%	118%	108%	102%
9-JDW SuperTif OnL	72	100%	110%	114%	111%	102%	111%	104%	104%	164%	106%	124%	123%	101%	108%	132%

	Débits cumulés calculés à partir du débit moyen mesuré des goutteurs															
	20/07	27/07	03/08	18/08	24/08	31/08	09/09	16/09	23/09	29/09	07/10	14/10	21/10	28/10		
1-JDW T-Tape	1558	440	706	1861	692	819	1053	1025	813	738	885	639	850	726		
2- NTF Streamline	1316	757	548	1507	642	764	1094	870	797	654	1062	899	787	905		
3-NDJ Tape	1192	811	923	2225	940	920	1433	1165	957	672	1390	921	1060	1061		
4-NDJ Turbo Aqura InL	3190	1895	1889	4218	1639	1949	2636	1932	1966	1624	2189	1907	2023	1928		
5-NDJ Turbo Key OnL	4316	1675	1991	4321	1716	1970	2679	1536	1980	1897	2804	1847	1957	1779		
6-NTF Bioline InL	1023	1360	1171	3105	1087	1306	1781	1331	1295	1083	1479	1565	1387	1376		
7-NTF PC Basic OnL	3796	1976	2005	4451	1757	2072	2665	2072	2041	1804	3155	2109	2062	1940		
8-JDW Hydrogol InL	3173	1792	1823	2326	1582	1847	2333	2768	1778	1578	2480	1724	1885	1996		
9-JDW SuperTif OnL	3339	1725	1778	4126	1522	1899	2431	1199	1866	1366	2057	1942	1824	1492		

	Si négatif le compteur est bloqué ; Si positif : surestimation et/ou fuites															
	20/07	27/07	03/08	18/08	24/08	31/08	09/09	16/09	23/09	29/09	07/10	14/10	21/10	28/10		
Comparaison comptage-débits goutteurs 1-5	-4650	2630	2797	5221	2441	714	2725	-2960	-5311	-4769	-7445	-5440	-6272	-6189		
Comparaison comptage-débits goutteurs 6-8	-4718	1255	1046	3885	587	-962	1234	590	387	1157	371	711	-257	-29		
Comparaison comptage-débits goutteurs 9	-2242	361	213	419	128	-494	228	1047	-37	888	1019	750	228	594		
Reconstitution débits goutteurs 1-5	11572	17149	23205	37337	42966	49387	58282	64809	71324	76909	85238	91451	98128	104528		
Reconstitution débits goutteurs 6-8	7992	13121	18120	28002	32428	37653	44432	50603	55717	60181	67296	72693	78026	83338		
Reconstitution débits goutteurs 9	3339	5064	6842	10968	12490	14389	16819	18018	19885	21251	23308	25251	27075	28567		

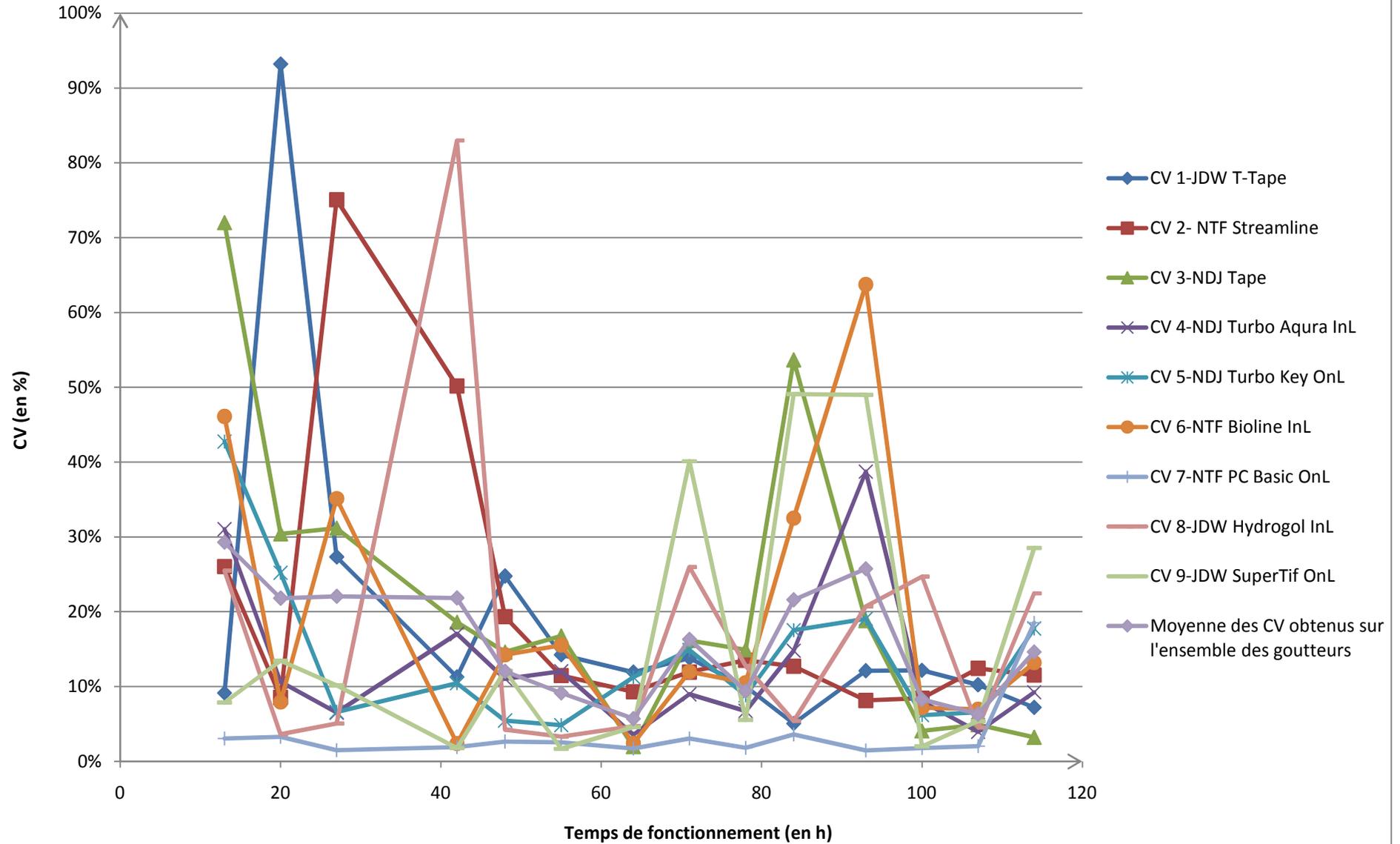
Comparaison Volumes Compteurs et Volumes reconstitués

- Fuveau -



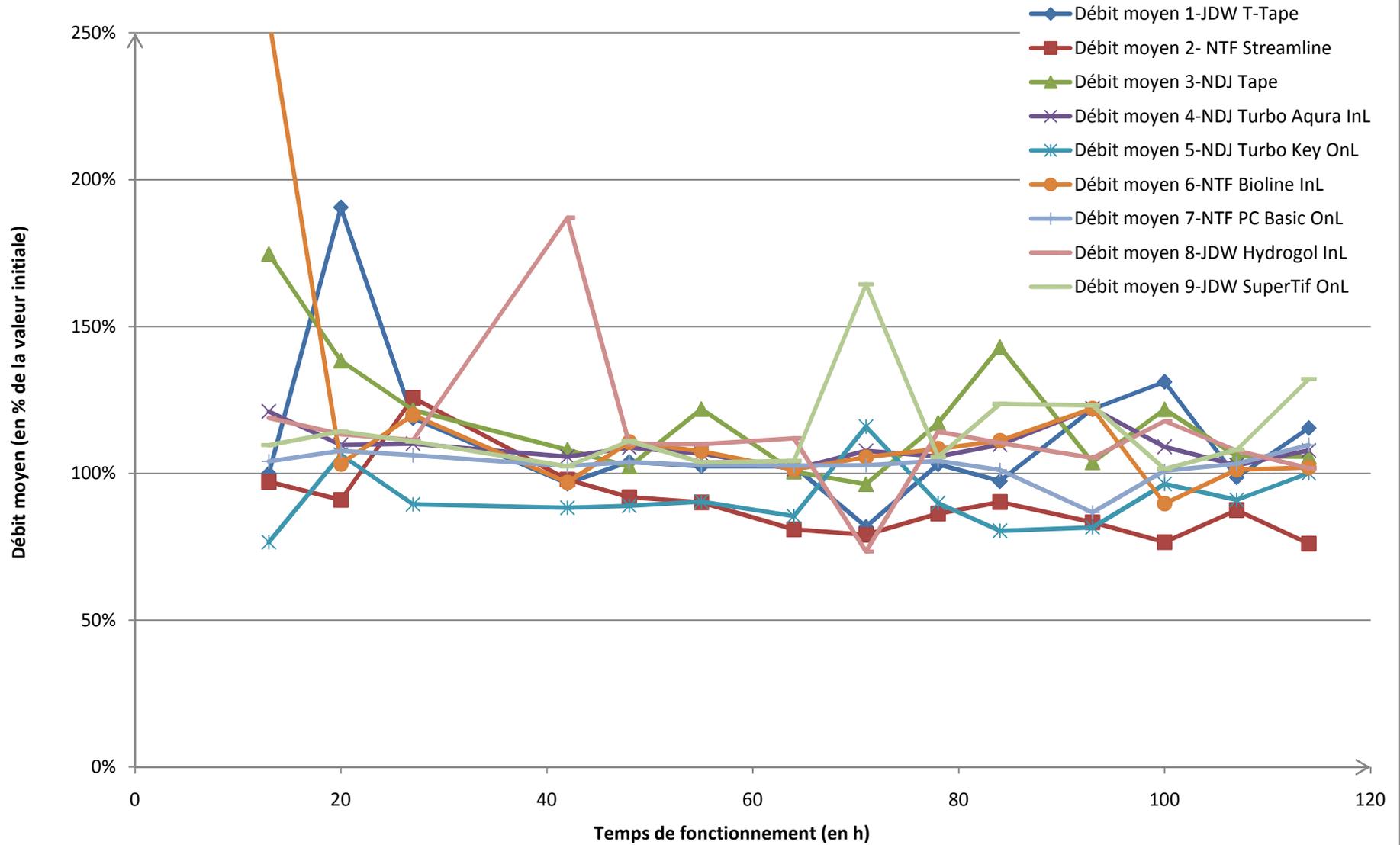
Evolution du CV en fonction du temps de fonctionnement

- *Fuveau* -



Evolution du débit moyen en fonction du temps de fonctionnement

- *Fuveau* -



Annexe 46 : Tableau récapitulatif de certains résultats obtenus sur le site de Bouc-Bel-Air.

	29/07	05/08	18/08	26/08	02/09	09/09	16/09	29/09	07/10	14/10	21/10	28/10
Compteur 1-5	16372	25341		50857	59053	66663	73705	102365	111008	118575	125879	133030
Compteur 6-8	9290	14857		50091	55404	75814	81000	89040	142303	147093	151924	156798
Compteur 9	3820	6177		20801	23073	32833	34890	38898	67234	67233	69225	71386
Nombre de jours	7	7	14	8	7	7	7	13	8	7	7	7
Temps fonctionnement (h)	7	14	28	36	43	50	57	70	78	85	92	99
Volume par heure 1-5		640,6		957,9	992,6	1005,8	1005,8	1228,5	1213,3	1202,4		1178,4
Volume par heure 6-8		397,6		1133,4	1072,4	1330,5	1258,1	1139,3	1705,3	1621,2		1490,0
Volume par heure 9		168,4		471,7	447,7	580,3	545,1	501,1	813,0	746,0		682,5

	Nombre	Débit moyen												
		22/07	29/07	05/08	18/08	26/08	02/09	09/09	16/09	29/09	07/10	14/10	21/10	28/10
1-JDW T-Tape	94	0,82	1,15	1,16	1,08	1,07	1,16	1,20	0,91	1,34	1,13	1,22	1,2	1,08
2- NTF Streamline	94	0,68	0,91	0,99	0,90	0,61	0,68	0,58	0,59	0,79	0,79	0,59	0,3	0,30
3-NDJ Tape	94	1,15	1,45	1,17	1,01	1,50	1,29	1,39	0,90	1,41	1,54	1,40	1,4	1,03
4-NDJ Turbo Aqura InL	94	2,35	2,41	2,35	0,89	2,20	2,09	1,47	1,68	2,60	2,60	2,56	2,7	1,81
5-NDJ Turbo Key OnL	80	4,53	3,84	3,59	2,18	4,24	3,75	4,14	2,62	4,15	4,20	4,15	4,4	3,07
6-NTF Bioline InL	94	1,37	1,52	1,47	1,95	1,63	1,64	1,72	1,84	0,56	1,55	1,45	1,6	1,47
7-NTF PC Basic OnL	80	3,77	3,75	3,81	1,64	3,92	3,20	3,95	3,94	2,33	3,40	4,08	3,8	3,76
8-JDW Hydrogol InL	94	2,57	2,34	2,20	3,90	1,88	2,03	1,57	1,63	0,90	2,20	2,27	2,6	2,13
9-JDW SuperTif OnL	86	3,38	3,43	2,84	2,95	3,67	3,79	3,93	3,78	1,03	3,07	3,83	3,7	3,59

	Coefficient de variation													
	22/07	29/07	05/08	18/08	26/08	02/09	09/09	16/09	29/09	07/10	14/10	21/10	28/10	
1-JDW T-Tape	31,9%	44,4%	39,7%	22,8%	8,8%	7,2%	5,9%	3,2%	12,0%	17,4%	9,0%	7,2%	12,3%	
2- NTF Streamline	29,8%	46,5%	53,7%	49,2%	12,6%	11,0%	18,5%	11,7%	2,6%	19,0%	51,2%	109,8%	109,6%	
3-NDJ Tape	19,9%	8,3%	50,6%	4,4%	4,3%	1,9%	3,3%	6,2%	11,8%	7,4%	6,5%	11,2%	18,3%	
4-NDJ Turbo Aqura InL	16,7%	23,0%	10,9%	5,5%	7,8%	10,9%	10,1%	10,5%	5,8%	9,5%	10,0%	9,3%	20,5%	
5-NDJ Turbo Key OnL	13,0%	13,5%	38,1%	7,6%	14,9%	4,3%	1,9%	4,6%	16,6%	5,1%	14,7%	5,5%	27,0%	
6-NTF Bioline InL	14,4%	4,5%	22,6%	47,0%	10,7%	2,3%	2,2%	11,6%	88,6%	11,4%	33,8%	8,5%	13,0%	
7-NTF PC Basic OnL	4,4%	2,4%	2,0%	5,0%	1,2%	43,7%	1,8%	2,7%	7,0%	4,9%	9,3%	2,0%	2,7%	
8-JDW Hydrogol InL	8,6%	1,0%	24,7%	2,4%	14,6%	5,9%	1,4%	11,2%	7,2%	7,1%	24,5%	6,9%	10,4%	
9-JDW SuperTif OnL	13,5%	6,5%	46,4%	49,2%	5,8%	2,6%	2,5%	4,7%	112,7%	13,1%	4,1%	14,0%	4,1%	
Moyenne des CV obtenus sur l'ensemble des goutteurs	16,9%	16,7%	32,1%	21,5%	9,0%	10,0%	5,3%	7,4%	29,4%	10,5%	18,1%	19,4%	24,2%	

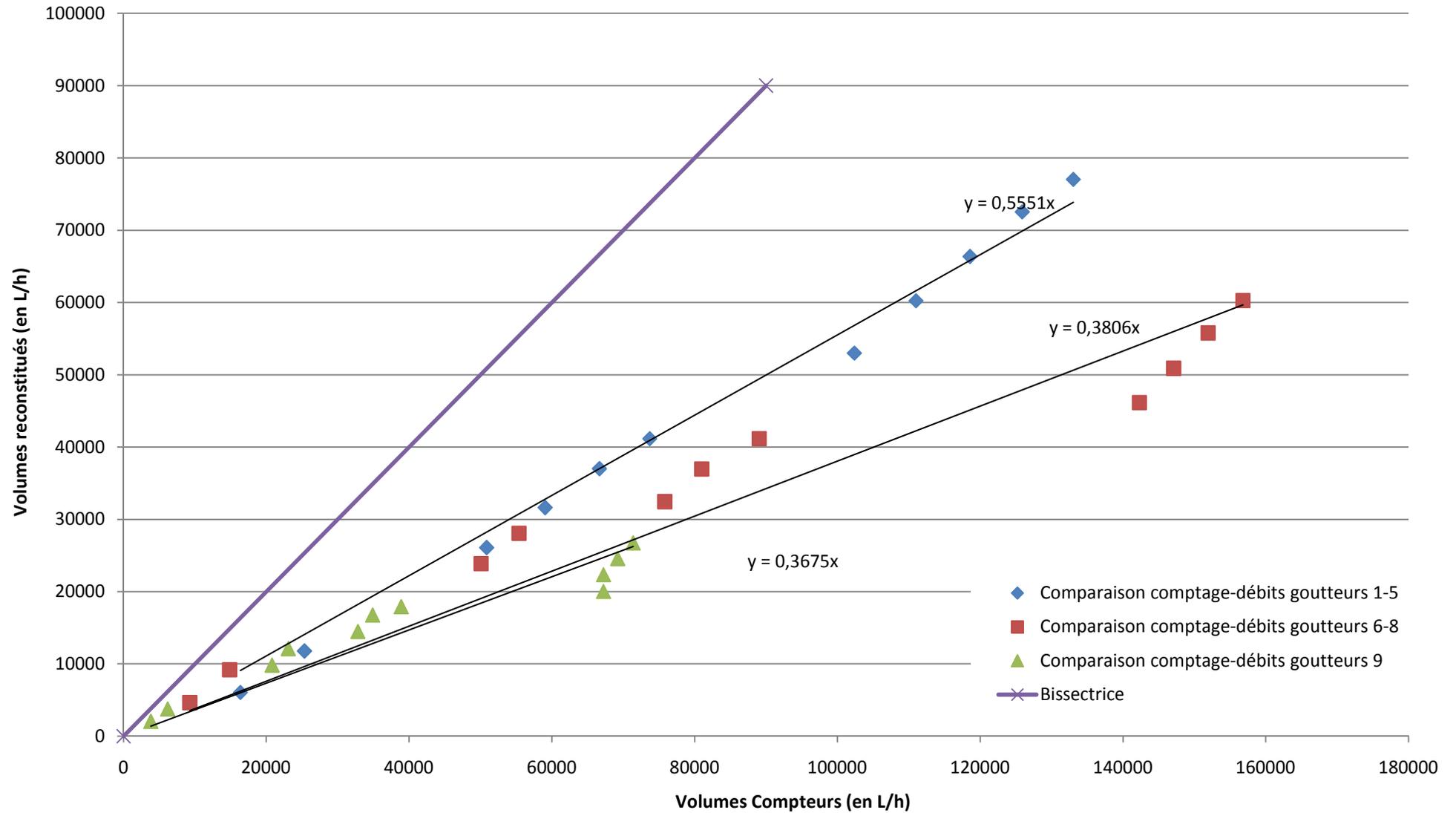
	Débit moyen mesuré en % du débit initial												
	Nombre	29/07	05/08	18/08	26/08	02/09	09/09	16/09	29/09	07/10	14/10	21/10	28/10
1-JDW T-Tape	94	100%	101%	94%	94%	101%	105%	80%	117%	98%	107%	108%	94%
2- NTF Streamline	94	100%	108%	99%	67%	75%	64%	65%	87%	87%	65%	38%	33%
3-NDJ Tape	94	100%	81%	70%	103%	89%	96%	62%	97%	106%	96%	97%	71%
4-NDJ Turbo Aqura InL	94	100%	97%	37%	91%	87%	61%	70%	108%	108%	106%	111%	75%
5-NDJ Turbo Key OnL	80	100%	93%	57%	110%	98%	108%	68%	108%	109%	108%	114%	80%
6-NTF Bioline InL	94	100%	97%	128%	107%	108%	113%	121%	37%	102%	95%	106%	97%
7-NTF PC Basic OnL	80	100%	102%	44%	105%	85%	106%	105%	62%	91%	109%	101%	100%
8-JDW Hydrogol InL	94	100%	94%	166%	80%	87%	67%	70%	38%	94%	97%	112%	91%
9-JDW SuperTif OnL	86	100%	83%	86%	107%	110%	115%	110%	30%	90%	112%	108%	105%

	Débits cumulés calculés à partir du débit moyen mesuré des goutteurs												
	29/07	05/08	18/08	26/08	02/09	09/09	16/09	29/09	07/10	14/10	21/10	28/10	
1-JDW T-Tape	753	761	1420	808	764	789	599	1641	848	803	813	707	
2- NTF Streamline	597	648	1184	460	446	382	390	968	596	391	228	195	
3-NDJ Tape	955	771	1330	1126	848	917	594	1724	1155	919	930	680	
4-NDJ Turbo Aqura InL	1584	1543	1174	1652	1375	970	1106	3182	1958	1687	1754	1189	
5-NDJ Turbo Key OnL	2150	2010	2440	2712	2101	2321	1466	4316	2688	2325	2441	1721	
6-NTF Bioline InL	1001	966	2564	1229	1081	1132	1213	684	1166	951	1060	966	
7-NTF PC Basic OnL	2098	2132	1831	2509	1793	2214	2209	2426	2176	2285	2116	2108	
8-JDW Hydrogol InL	1542	1448	5128	1410	1336	1036	1075	1102	1653	1496	1726	1402	
9-JDW SuperTif OnL	2065	1708	3547	2524	2279	2366	2275	1147	2115	2307	2238	2161	

	Si négatif le compteur est bloqué ; Si positif : surestimation et/ou fuites												
	29/07	05/08	18/08	26/08	02/09	09/09	16/09	29/09	07/10	14/10	21/10	28/10	
Comparaison comptage-débits goutteurs 1-5	10331	3237		11209	2663	2232	2887	16829	1398	1442	1138	9962	
Comparaison comptage-débits goutteurs 6-8	4649	1020		20563	1103	16028	689	3827	48269	57	-71	5230	
Comparaison comptage-débits goutteurs 9	1755	649		8553	-7	7394	-218	2861	26221	-2308	-246	1992	
Reconstitution débits goutteurs 1-5	6041	11773	19322	26079	31613	36991	41146	52978	60223	66348	72514	77007	
Reconstitution débits goutteurs 6-8	4641	9188	18711	23859	28069	32451	36948	41161	46155	50888	55790	60265	
Reconstitution débits goutteurs 9	2065	3773	7320	9845	12124	14490	16765	17912	20027	22333	24571	26732	

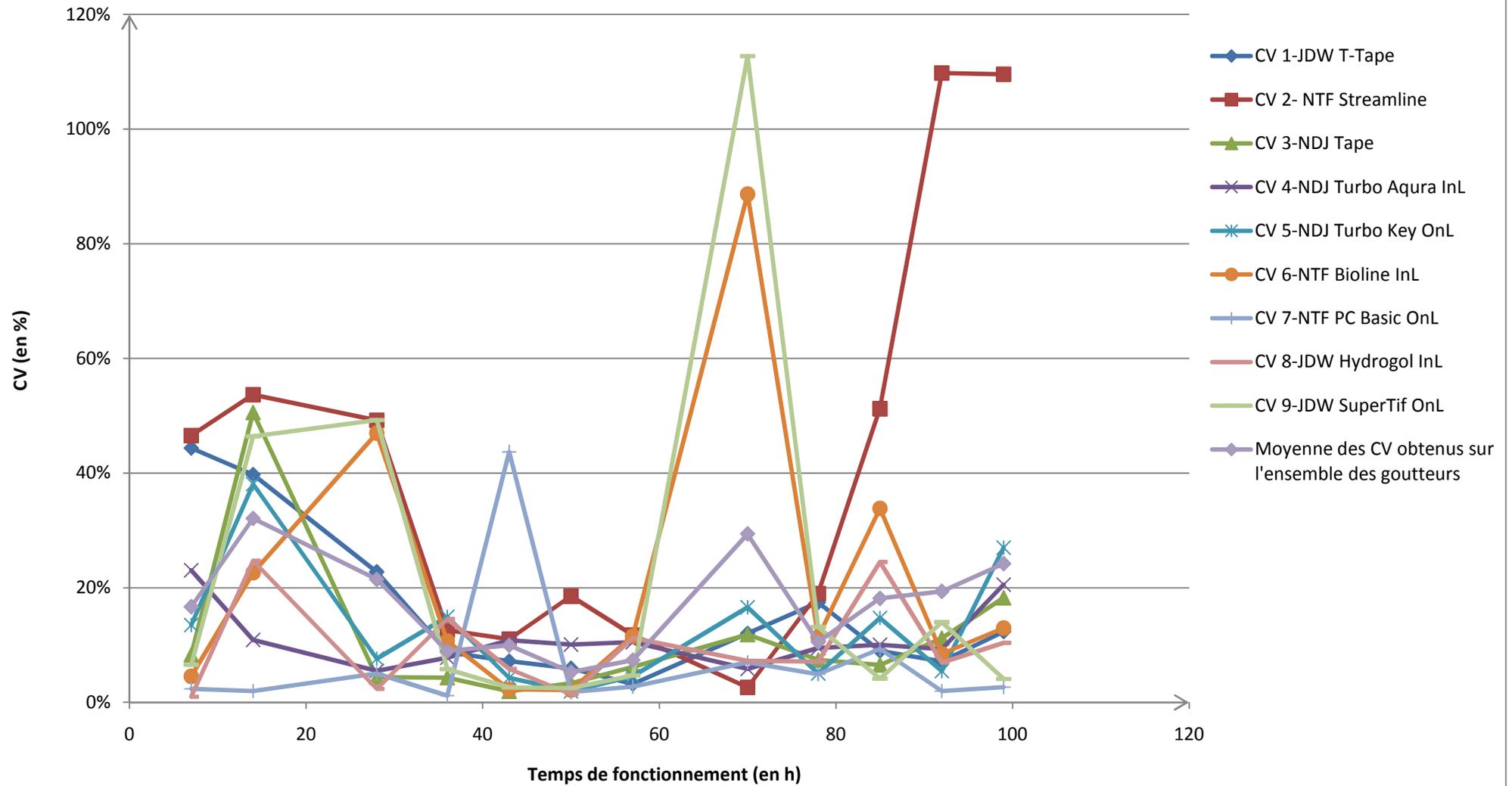
Comparaison Volumes Compteurs et Volumes reconstitués

- Bouc-Bel-Air -



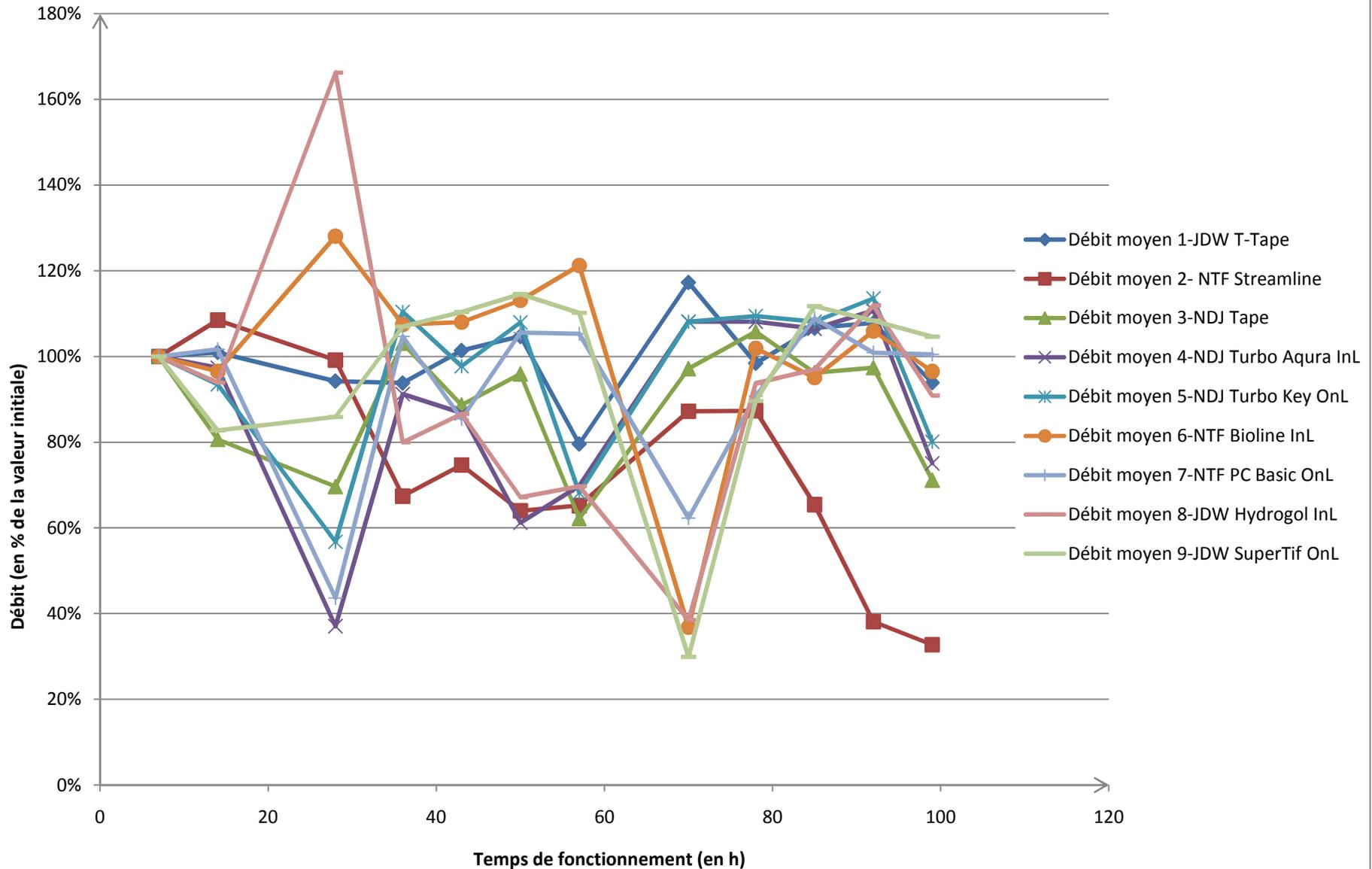
Evolution des CV au cours du temps de fonctionnement

- Bouc-Bel-Air -



Evolution du débit moyen au cours du temps de fonctionnement

- Bouc-Bel-Air -



Annexe 47 : Analyse statistique du comportement des débits moyens.

Par manque de temps, les analyses statistiques, présentées ci dessous, ont été réalisées à partir des débits moyens. Il serait intéressant d'effectuer ce même travail à partir des données brutes, de manière à intégrer toutes les composantes de la variabilité de mesures. Cependant, on peut tout de même tirer quelques conclusions intéressantes.

Test d'homogénéité des variances de Levene.

On utilise l'ensemble des débits moyens mesurés sur la totalité des modèles, pour identifier d'éventuelles tendances générales. On teste l'hypothèse nulle $H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \dots = \sigma_k^2$, toutes les variances sont égales.

Pour les deux sites, on obtient F (valeur observée) > F (valeur critique) et $p < 0,05$. On rejette donc l'hypothèse nulle d'égalité des variances. Autrement dit, l'inégalité des variances est significative. On en déduit que les différences observées ne sont probablement pas dues au fonctionnement du dispositif expérimental, mais bien au fonctionnement des goutteurs eux-mêmes.

Fuveau		Bouc-Bel-Air	
F (valeur observée)	2,915	F (valeur observée)	3,359
F (valeur critique)	2,295	F (valeur critique)	2,323
ddl 1	8	ddl 1	8
ddl 2	125	ddl 2	99
p-value unilatérale	0,005	p-value unilatérale	0,002
Alpha	0,05	Alpha	0,05

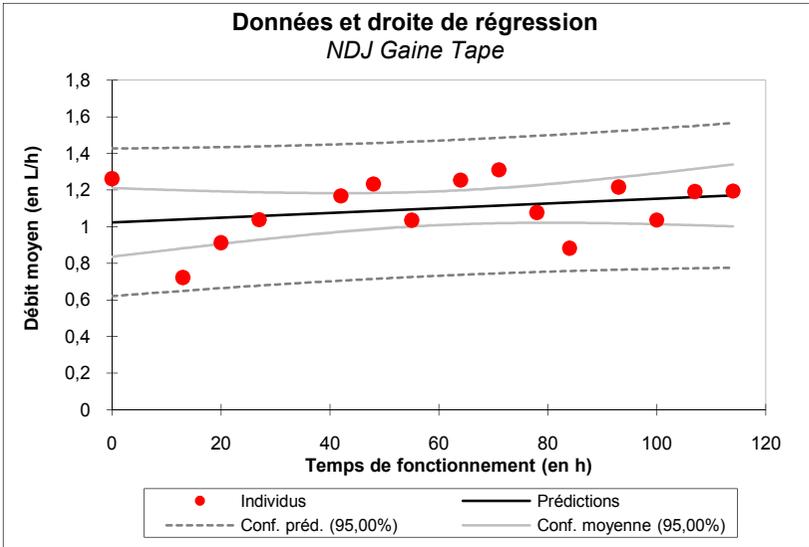
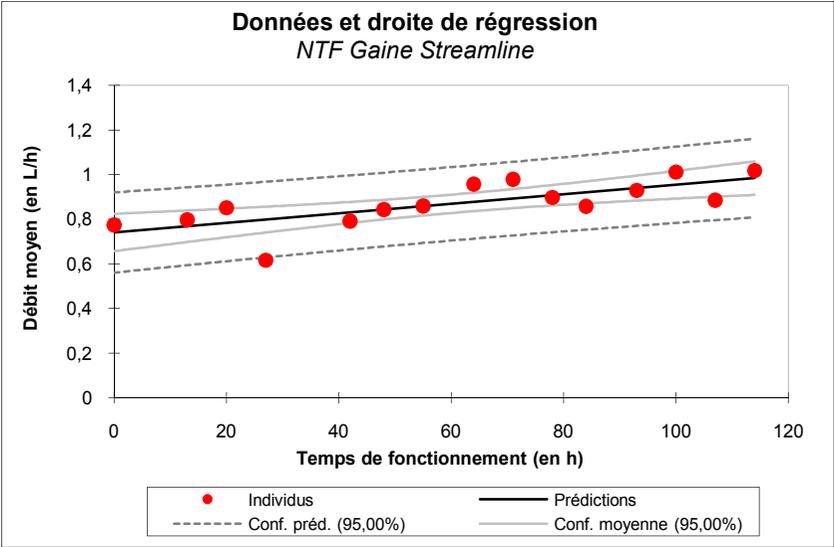
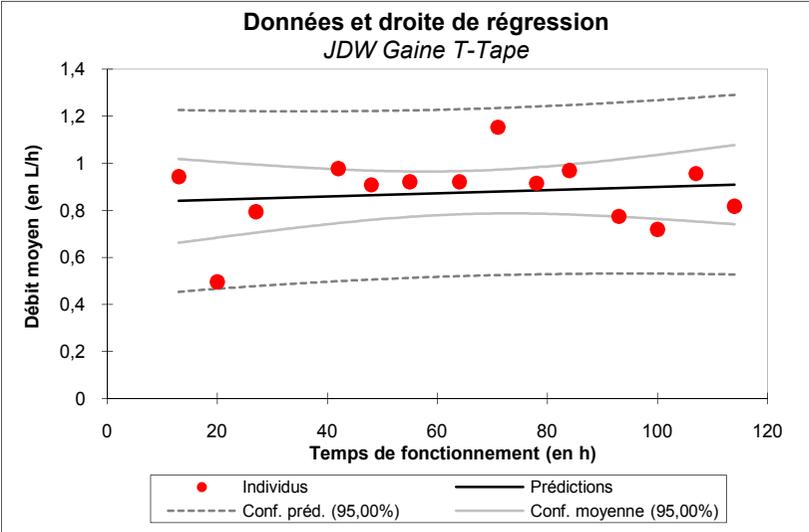
Seuil de signification : 0,05.

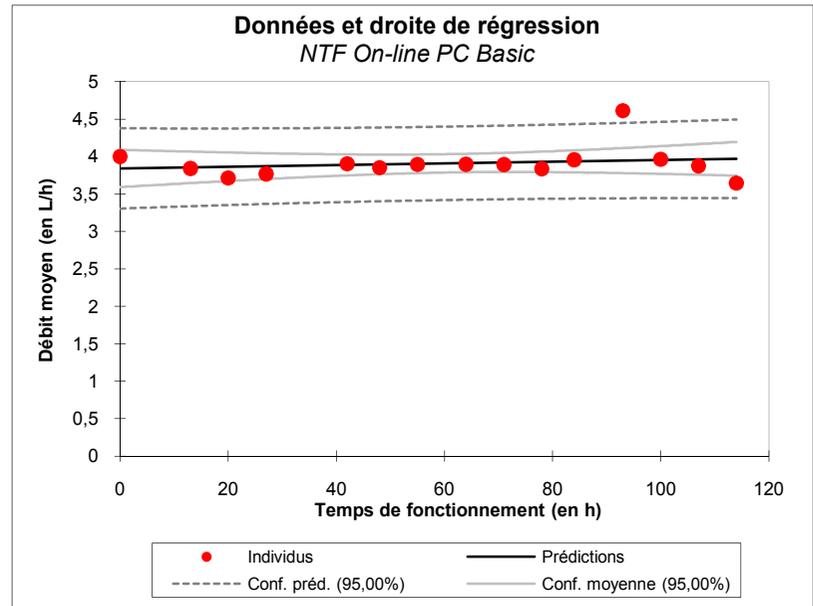
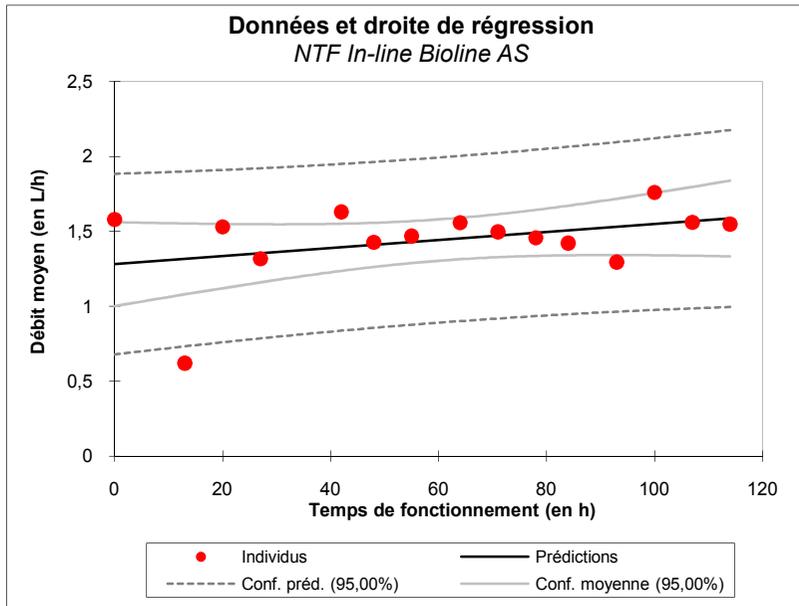
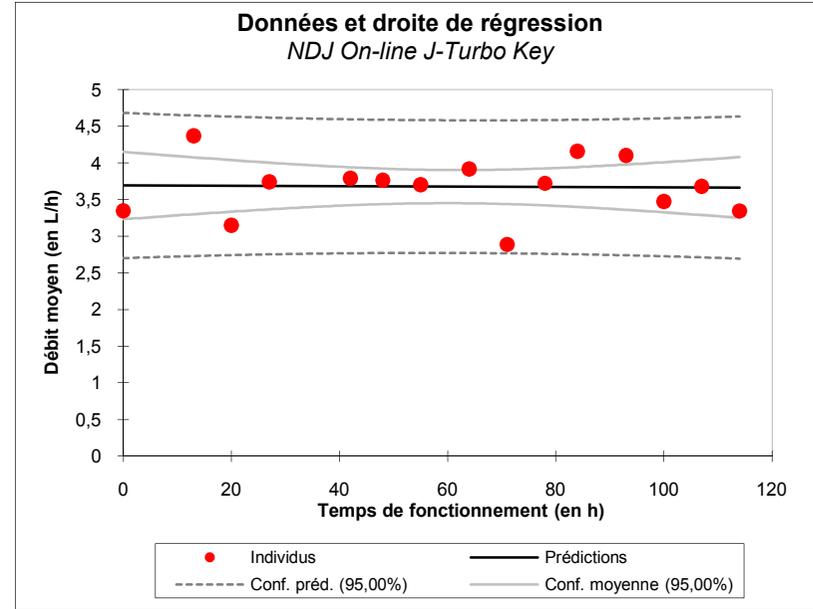
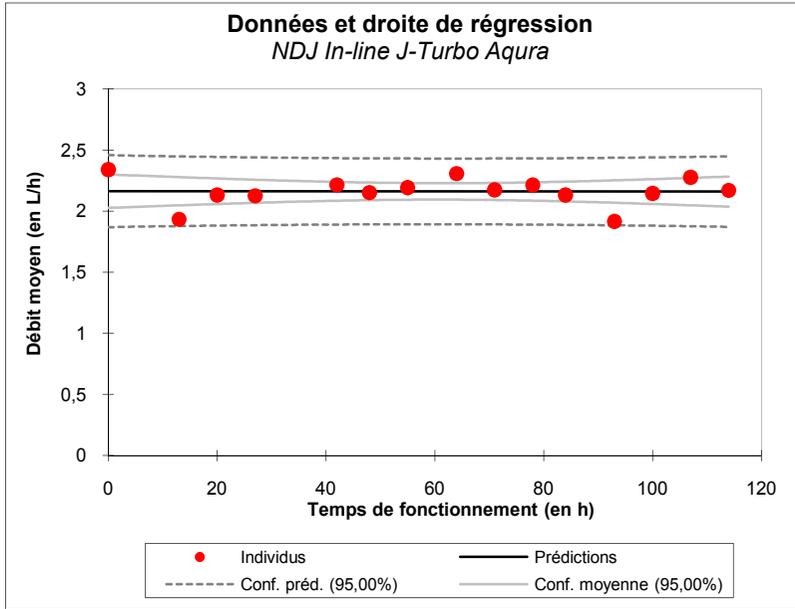
Résultats de l'Anova pour le site de Fuveau sur chaque modèle de goutteur.

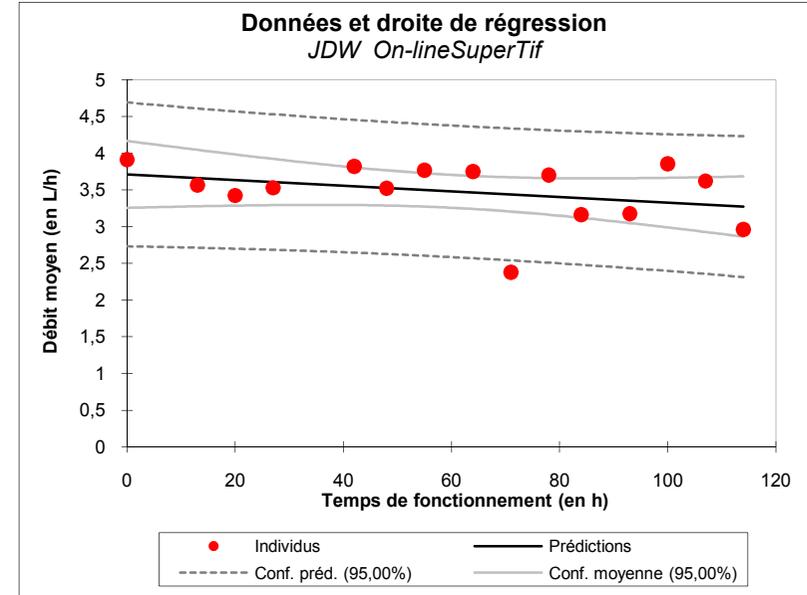
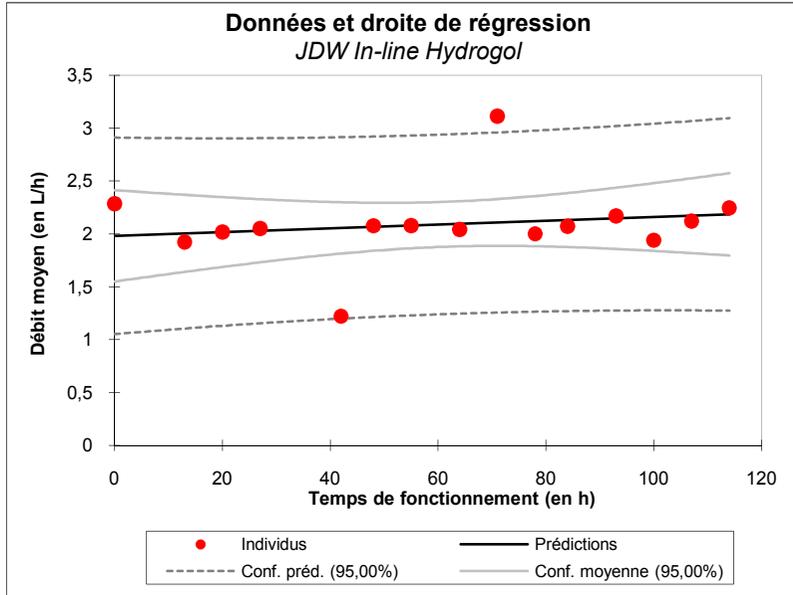
	1-JDW T-Tape	2- NTF Streamline	3-NDJ Tape	4-NDJ Turbo Aqura InL	5-NDJ Turbo Key OnL	6-NTF Bioline InL	7-NTF PC Basic OnL	8-JDW Hydrogol InL	9-JDW SuperTif OnL
Ordonnée à l'origine	0,831	0,740	1,023	2,163	3,691	1,281	3,842	1,981	3,711
Pente	0,001	0,002	0,001	0,000	0,000	0,003	0,001	0,002	-0,004

On observe que les pentes des droites de régression des débits moyens mesurés en fonction du temps de fonctionnement, sont proches de zéro. Les débits moyens des goutteurs ont tendance à croître (pente positive), à l'exception de la ligne 9. On a donc un comportement homogène des goutteurs, hormis ceux de la ligne n°9 (cf. droites de régression).

Pour chacune des lignes, les débits moyens sont situés dans l'intervalle de confiance de la moyenne (calculé à partir des échantillons prélevés).





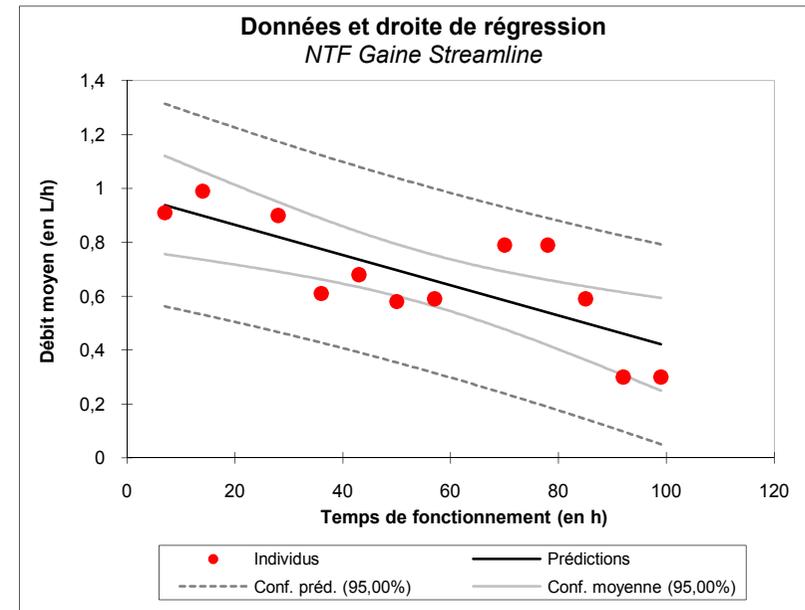
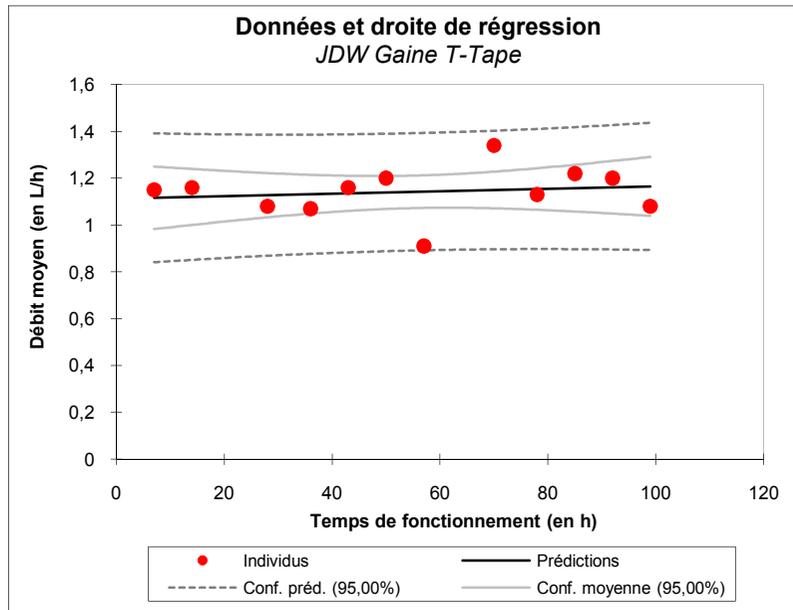


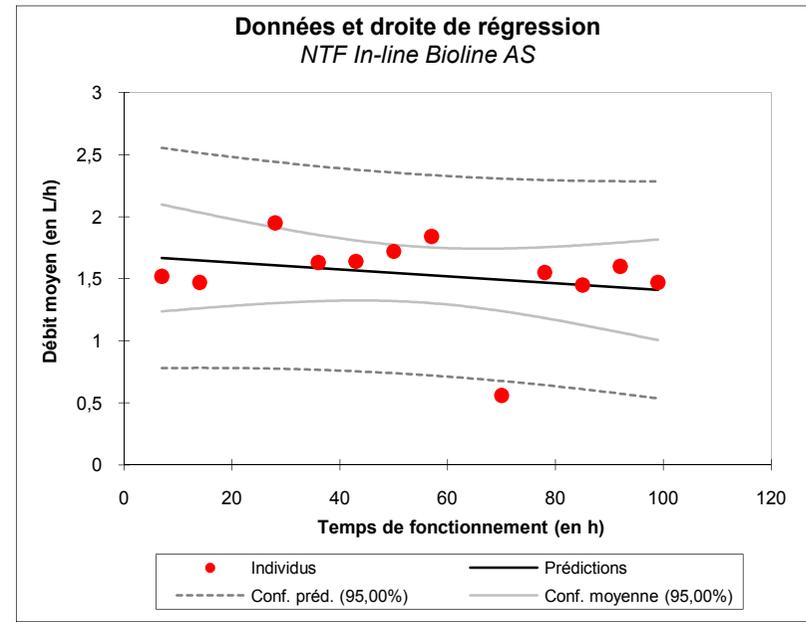
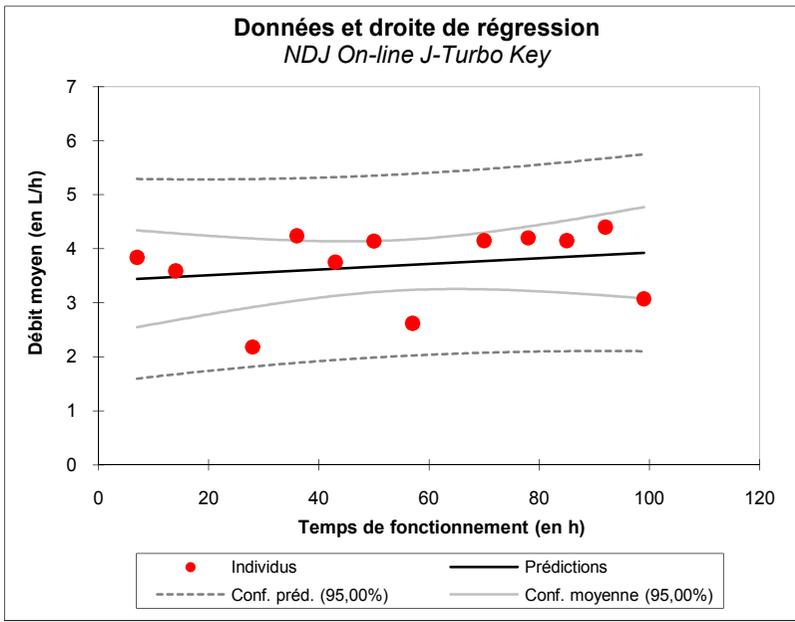
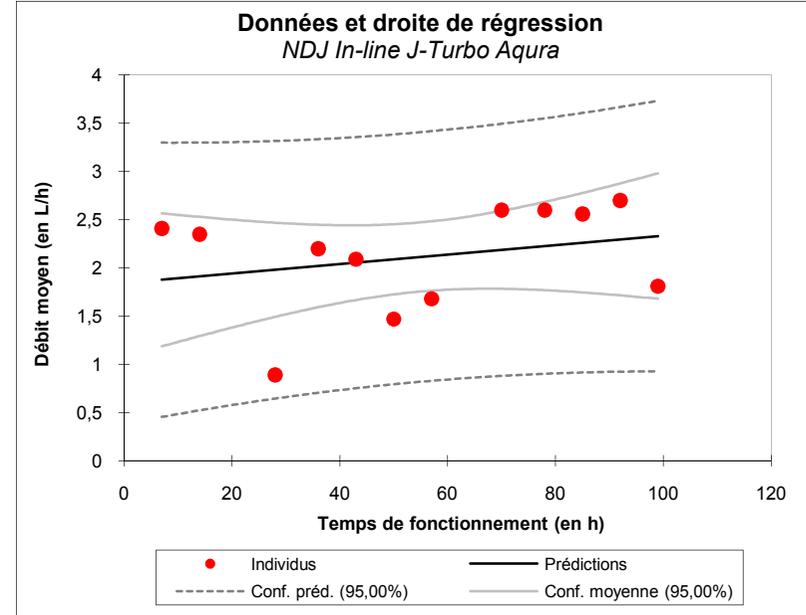
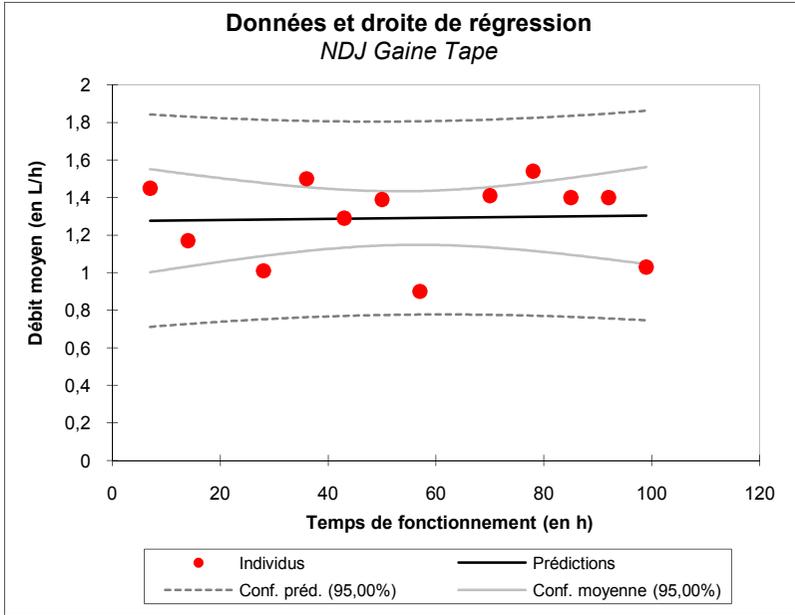
Résultats de l'Anova pour le site de Bouc-Bel-Air.

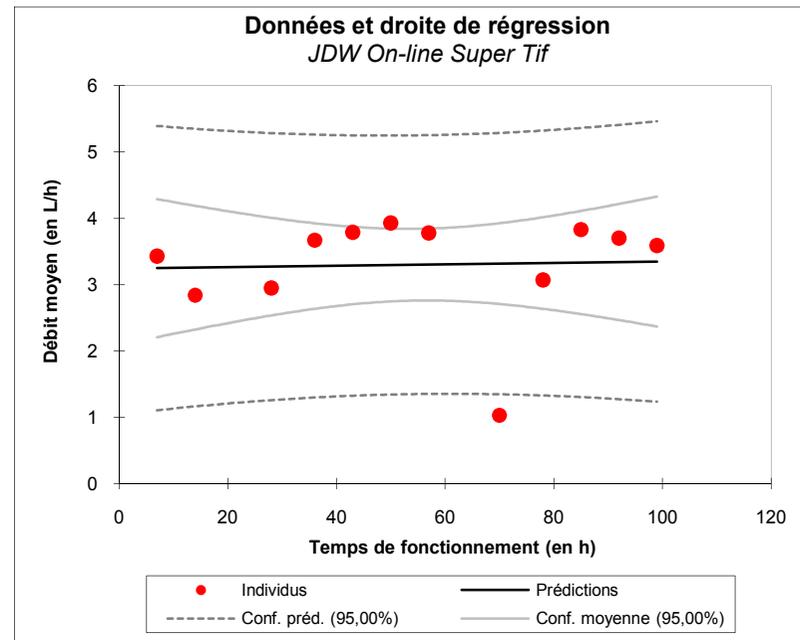
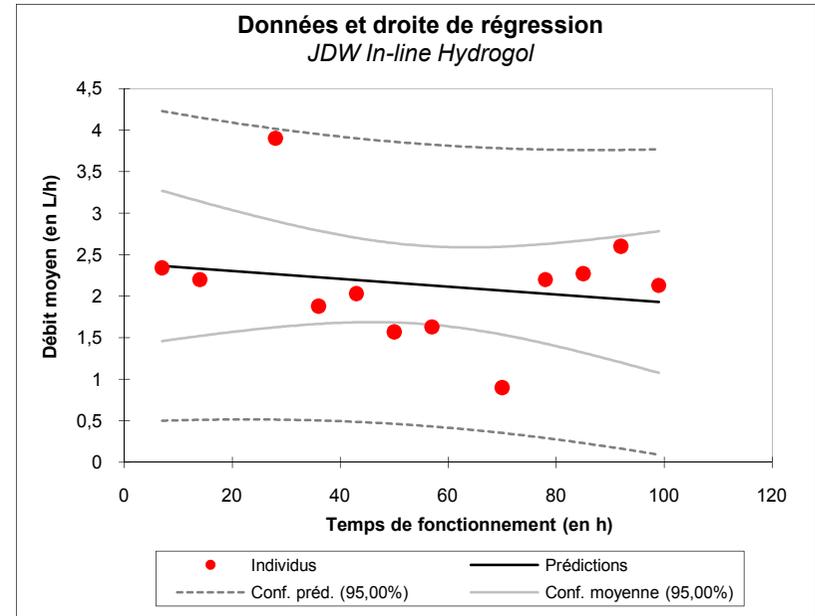
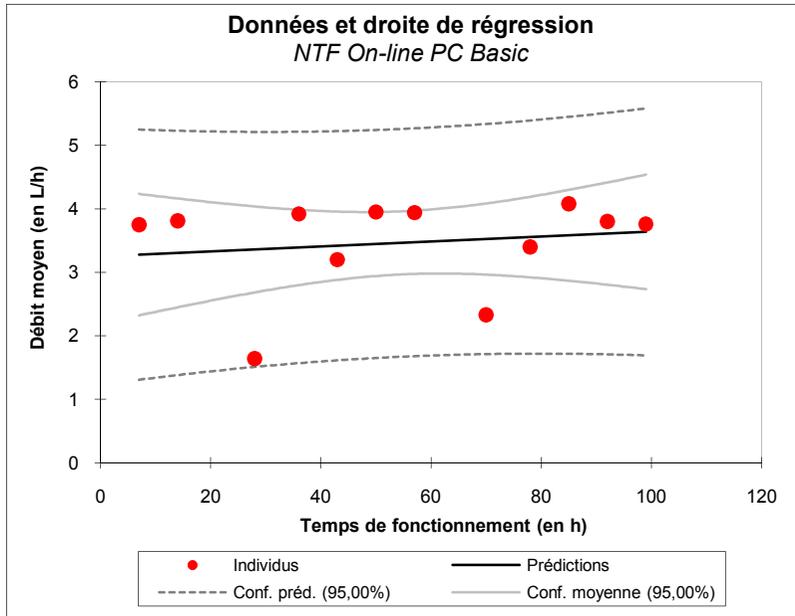
	1-JDW T-Tape	2- NTF Streamline	3-NDJ Tape	4-NDJ Turbo Aqura InL	5-NDJ Turbo Key OnL	6-NTF Bioline InL	7-NTF PC Basic OnL	8-JDW Hydrogol InL	9-JDW SuperTif OnL
Ordonnée à l'origine	1,113	0,978	1,275	1,843	3,406	1,687	3,251	2,397	3,241
Pente	0,001	-0,006	0,000	0,005	0,005	-0,003	0,004	-0,005	0,001

Les pentes observées des droites de régression des débits moyens mesurés en fonction du temps de fonctionnement, sont proches de la nullité. Certaines lignes montrent une tendance à la hausse (ligne n°1, n°4, n°5, n°7 et n°9), tandis que d'autres montrent une tendance à la baisse (ligne n°2, n°6 et n°8). Le comportement des débits moyens des différentes lignes ne sont donc pas transposables d'un site à l'autre ; on n'observe aucune tendance commune entre Fuveau et Bouc-Bel-Air.

Ce comportement hétérogène des différents types de goutteurs laisse penser que les eaux de Bouc-Bel-Air sont sans doute plus chargées ou que le relief particulier induit une tendance au colmatage plus marquée, mais pas sur les mêmes types de goutteurs.







Annexe 48 : Calcul de l'incertitude.

Les instruments de mesure n'étant pas de précision infinie, les mesures faites pendant une expérience ne sont pas exactes. Il est donc nécessaire d'évaluer ces incertitudes afin de savoir si nos hypothèses ne sont pas vérifiées exactement parce qu'elles sont fausses, ou parce que nos mesures sont incertaines. Le calcul de l'incertitude nous permet donc de déduire des marges d'erreurs en dehors desquelles nos hypothèses seront réfutées. Le calcul des incertitudes (notées Δx , pour la variable x) s'effectue selon les quelques règles énumérées ci-dessous.

Si ...	Alors ...
$c = a + b$	$\Delta c = \Delta a + \Delta b$
$c = a - b$	$\Delta c = \Delta a + \Delta b$
$c = a \times b$	$\Delta c = b\Delta a + a\Delta b$
$c = \frac{a}{b}$	$\Delta c = \frac{(b\Delta a + a\Delta b)}{b^2}$
a^n	$\Delta c = n \times a^{n-1} \times \Delta a$

Règles relatives au calcul de l'incertitude de précision.

Dans notre cas, l'incertitude des mesures sera liée aux incertitudes du manomètre (0,2 bars), de la balance (0,1 g), du chronomètre (2 s/goutteur sur une durée de 10 min) et des opérateurs (au nombre de 3).

Inc	
Chronomètre <i>(via l'opérateur)</i>	$t = 10 \text{ min} = 600\text{s}$ ET $\Delta t = \pm 2\text{s}$ $\Rightarrow \Delta t \ll t$ On considèrera l'incertitude due au chronomètre négligeable
Manomètre	$\Delta P = \pm 0,2 \text{ bar}$
Balance	$\Delta M = \pm 0,1 \text{ g}$
Opérateurs	Nombre d'opérateurs = 3

Inc

Ainsi, l'incertitude de précision pour le calcul des variations de pression en entrée et en sortie de gaine est comprise entre -0,4 bar et +0,4 bar. De la même façon, d'après la formule énoncée précédemment et sachant que ρ et t sont constantes, on aura :

- Pour le débit : $\Delta Q = \Delta M = \pm 0,1 \text{ L/h}$;
- Pour le débit moyen par gaine : $\Delta Q.m. = 6\Delta Q = 6\Delta M = \pm 0,6 \text{ L/h}$;
- Pour le débit moyen des 4 débits les plus faibles : $\Delta Q' = 4\Delta Q = 4\Delta M = \pm 0,4 \text{ L/h}$.

L'incertitude relative au coefficient d'uniformité sera, quant à elle, de : $\Delta CU = \frac{(\pm 0,4Qm) + (\pm 0,6Q')}{Qm^2}$.

Annexe 49 : Conditions d'expérimentation.

Conditions d'expérimentations		Problèmes récurrents de fluctuations de la pression
22/07/2010	/	
29/07/2010	Mesures en conditions ventées	
05/08/2010	/	
18/08/2010	Changements de collecteurs Vent fort	
26/08/2010	/	
02/09/2010	Chloration	
09/09/2010	/	
16/09/2010	/	
29/09/2010	Nettoyage du filtre 100µm Filtre 130 microns bloqué	
07/10/2010	Nettoyage du filtre 130 microns	
14/10/2010	/	

Conditions d'expérimentations pour le site de Bouc-Bel-Air.

Conditions d'expérimentations	
07/07/2010	Certaines gaines sectionnées
20/07/2010	Nouveau départ après réfection
27/07/2010	Mesures en conditions ventées
03/08/2010	Mesures en conditions ventées
18/08/2010	
24/08/2010	
31/08/2010	
09/09/2010	
16/09/2010	/
23/09/2010	
29/09/2010	
07/10/2010	
14/10/2010	

Conditions d'expérimentations pour le site de Fuveau.

Annexe 50 : Ouverture de goutteurs et observation du développement ou non d'un biofilm.



≠



Goutteur en dérivation prélevé sur le site de
Bouc-Bel-Air.



Aucun développement de biofilm n'est
constaté.

Goutteur présentant le développement d'un
biofilm au niveau du labyrinthe.

Source : (GAMRI, 2010).

Annexe 51 : Photographies du filtre 130 µm avant et après



**NETTOYAGE
DU FILTRE**



Annexe 52 : Photographies du filtre 100 µm avant et après nettoyage.



NETTOYAGE
DU FILTRE



Annexe 53 : Prolifération des algues.



Prolifération au niveau des goutteurs montés en dérivation.



Prolifération au niveau des gaines.

Annexe 54 : Photographies du dispositif expérimental avant et après la pose des collecteurs sous les goutteurs.



Annexe 55 : Recyclage de solutions de drainage des cultures florales hors-sol.

Les horticulteurs du bassin hyérois pratiquent depuis de nombreuses années le recyclage des solutions de drainage des cultures florales hors-sol. Ce système est en démonstration à la station expérimentale de Scradh. Cette pratique permet aux horticulteurs de protéger leur ressource sol des nitrates, puisque la zone en question y est très sensible. Cela permet également une économie d'engrais comprise entre 30 et 60 cts/m², selon la culture considérée et les pratiques initiales (en drainage ouvert). Le document ci-joint détaille le principe de fonctionnement. La Chambre d'Agriculture du Var n'a pas souhaitée communiquer de liste de producteurs.

LE RECYCLAGE DES SOLUTIONS DE DRAINAGE EN CULTURES HORS-SOL

Pourquoi concevoir une installation de recyclage des solutions nutritives ?

- **Des avantages pour l'environnement : préservation d'une ressource naturelle, vitale, rare et de plus en plus chère**

Les rejets sont presque nuls ; la quasi totalité des éléments fertilisants sont consommés par les plantes. La consommation d'eau est fortement réduite

- **Des avantages économiques** : des temps de retour sur investissements souvent inférieurs à 3 ans.

Des économies de fertilisants d'environ 50 à 60% Des économies d'eau de l'ordre de 40 à 50%

- **Des obligations réglementaires (loi sur l'eau)**

Comment concevoir une installation de recyclage des solutions nutritives ?

- **Les différents systèmes de recyclage**

Le recyclage en circuit fermé : les effluents collectés sont réutilisés en totalité sur la même culture.

Le recyclage en circuit ouvert : les effluents sont ici utilisés pour irriguer et fertiliser une culture en pleine terre. Les besoins en eau et fertilisants de cette 2^{ème} culture doivent donc égaux ou supérieurs à la quantité et richesse des volumes à épandre.

- **Les 4 étapes du recyclage en circuit fermé**

Récupération du surplus d'arrosage : à l'aide de gouttières étanches sur chaque rang de culture

Centralisation et stockage : à l'aide de cuves de 200 L enterrées en bas de parcelles, munies de pompes immergées qui régulièrement centralisent les drainages dans un réservoir de plusieurs m³ situé à proximité de la station de ferti-irrigation

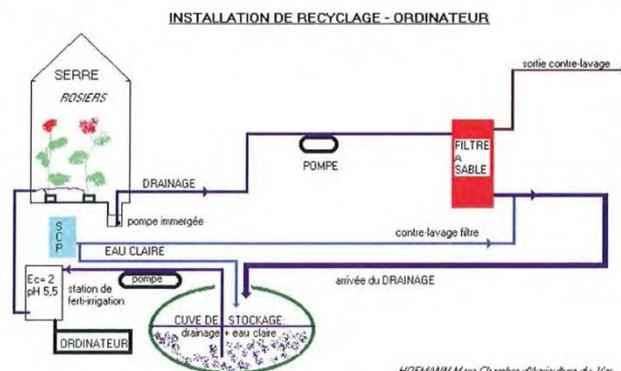
Traitement des solutions récupérées : filtration obligatoire – désinfection optionnelle

La **filtration**, réalisée le plus souvent par un filtre à sable à contre lavage automatique, permet d'éliminer les impuretés susceptibles de boucher le réseau d'irrigation. La **désinfection** peut-être préconisée en circuit fermé pour les plantes sensibles aux pathologies racinaires (Anthurium, Gerbera, Anémones, Renoncules...). On distingue principalement 3 systèmes:

- o Par la chaleur: il s'agit ici d'une pasteurisation à 90°C à l'aide d'échangeur
- o Avec des lampes à Ultra Violet: la filtration doit être très performante
- o Par injection de chlore gazeux: le moins coûteux et le plus répandu dans la région

Elaboration de la solution nutritive : à partir de l'eau claire, des effluents récupérés et de fertilisants, 2 modalités sont possibles en circuits fermés.

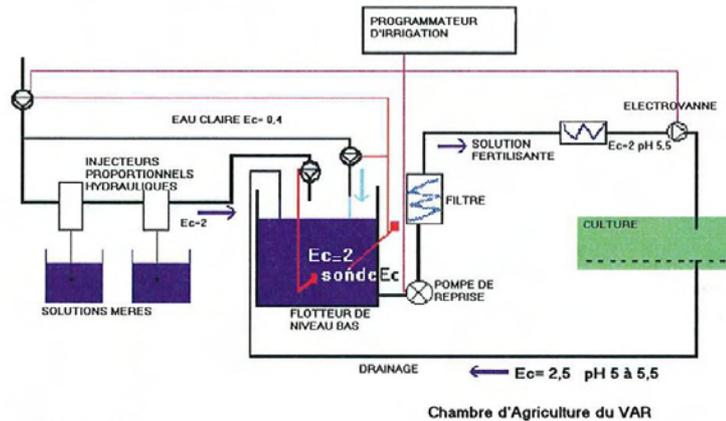
1/ à partir d'un ordinateur et d'une station de fertilisation asservie



2/ à partir d'une station simple selon le concept RECYVAR

RECYVAR

Système de recyclage avec station simple par gestion de la conductivité de la solution fille dans un réservoir.



Le système RECYVAR :

Gestion en continu de la conductivité d'une solution composée de drainage, d'eau claire et de solution fille "neuve". Une sonde de conductivité commande l'électrovanne d'arrivée d'eau claire.

La baisse du niveau dans le bassin déclenche une arrivée de solution fille station.

Le volume du bassin ne doit pas être trop faible afin d'éviter les risques de sur verses et le gaspillage incontrôlé du drainage.

La maîtrise du pH se révèle aisée du fait de la lenteur des évolutions (échelle de la semaine).

Le maintien du pH adéquat (5,5) s'effectue à l'aide de l'azote ammoniacal qui agit sur le pH des solutions de drainage ou par l'acidité des solutions mères qui agit directement sur la solution fille.

Contrôles de routine du pH et de l'Ec de la solution fille toutes les semaines et contrôle quotidien du niveau des 2 bacs de solutions mères.

Quelles aides à l'investissement pour le recyclage en cultures hors sol dans le Var ?

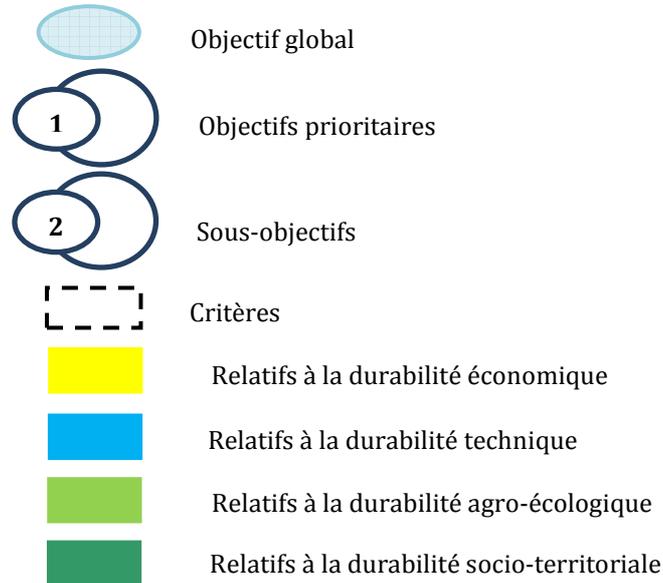
- **Soit le P.V.E. : Plan Végétal Environnement 2007-2013**
 - Taux d'aide d'environ 35% répartis en: 20% Etat-Union Européenne (ou 20% Région PACA U.E.), 15% Conseil Général du Var, (+ 5% pour les Jeunes Agriculteurs)
 - Instruction du dossier guichet unique de la D.D.A.F. du Var.
 - Matériel subventionné avec plancher d'investissements 4 000 € : système automatisé de préparation et de recyclage des solutions nutritives avec traçabilité pour les secteurs horticoles et maraîchers

- **Soit la circulaire serre VINIFLHOR avec complément du Conseil Général du Var et Conseil Régional PACA :**
 - Taux d'aide : entre 30% et 40% (jusqu'à 50% pour les J.A.)
 - Réalisation du dossier par la Chambre d'Agriculture du Var.
 - Matériels subventionnés avec plancher d'investissements (15 000 € en fleurs coupées) : postes récupération des eaux de drainage et système de désinfection des eaux de drainage de la Circulaire DGPEI/SDCPV/C2007-4040.

Annexe 56 : Organigramme global des objectifs et critères

Lorsqu'on entreprend d'étudier la meilleure approche pour évaluer la durabilité d'un système, il est

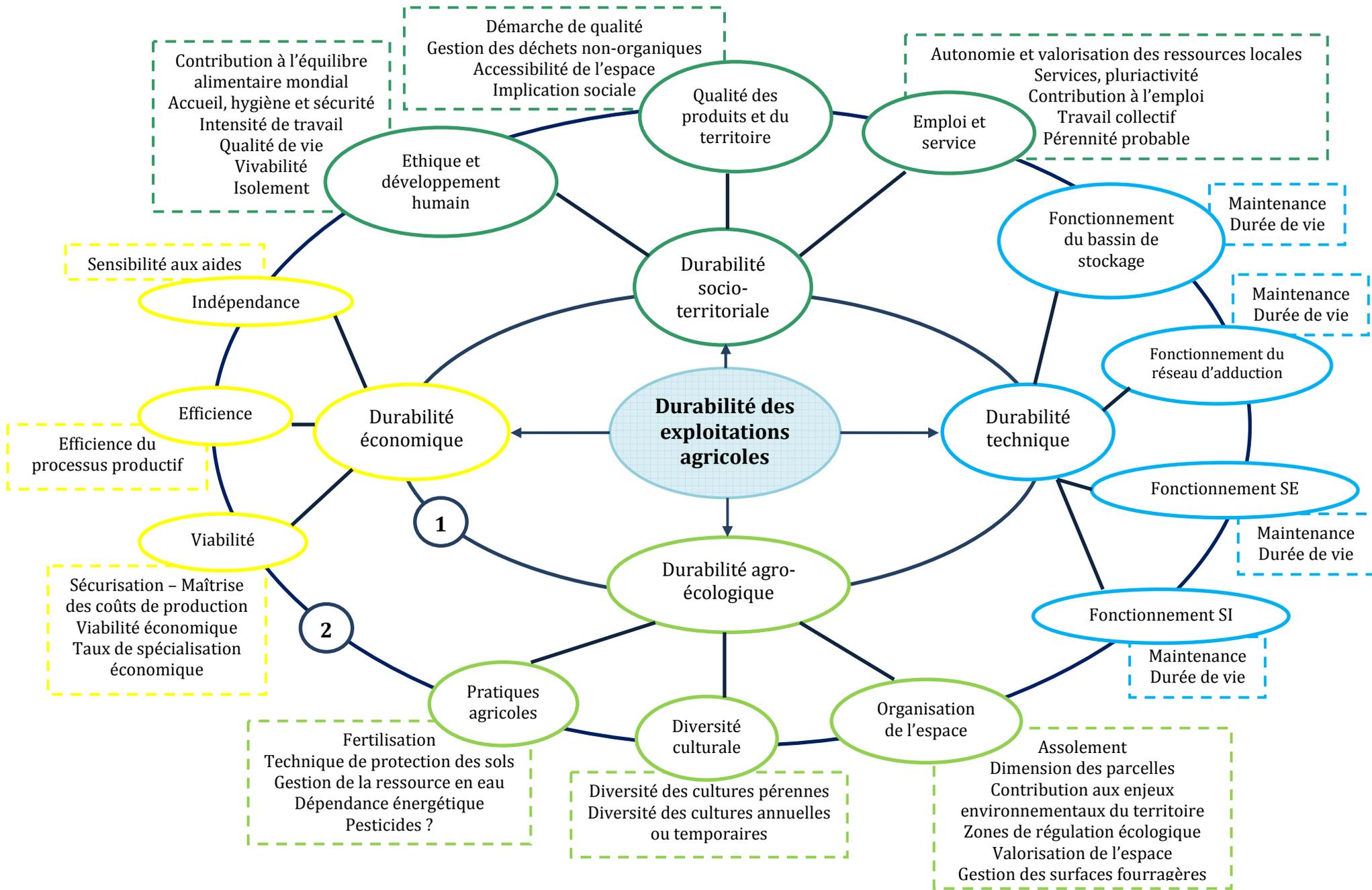
Légendes



essentiel d'avoir à l'esprit les différentes questions qui permettront de guider l'ensemble de l'approche, ainsi que les pièges à éviter (cf. ci-dessous).

Les questions à se poser	Réponses
<p>A qui est destinée l'évaluation ?</p> <p>Quel est l'objectif de cette évaluation ?</p> <p>Une méthode existante convient-elle ? Faut-il l'adapter ?</p> <p>Les indicateurs proposés sont-ils facilement calculables et lisibles ?</p> <p>Certains indicateurs retenus sont-ils redondants ou peu convaincants par rapport à l'objectif ?</p> <p>La validation des résultats des indicateurs est-elle prévue ?</p> <p style="text-align: center;">(GIRARDIN, 2005)</p>	<p>Aux agriculteurs.</p> <p>Evaluer l'impact de la REUT sur les EA.</p> <p>La méthode IDEA présente des indicateurs à adapter voire à compléter.</p> <p>Oui : pour la plupart. Non : pour ceux faisant appel à la subjectivité des agriculteurs (ex : qualité de vie).</p> <p>Le manque de temps nous empêche de réaliser cette étape de validation.</p>

Les pièges à éviter
<p style="text-align: center;">Se passer d'une étude bibliographique.</p> <p>Utiliser d'emblée une méthode disponible sans se poser les questions initiales de base.</p> <p>Utiliser un maximum d'indicateurs simples en pensant que cela permettra une évaluation plus précise.</p> <p>Avoir l'illusion de créer une nouvelle méthode en compilant les indicateurs de différentes méthodes.</p> <p style="text-align: center;">(GIRARDIN, 2005)</p>



Annexe 57 : Grille IDEA.

Grille IDEA 3 (janvier 2008) Échelle de durabilité agro-écologique

Composantes		Indicateurs	Valeurs maximales
Diversité domestique	A1	Diversité des cultures annuelles ou temporaires	14
	A2	Diversité des cultures pérennes	14
	A3	Diversité animale	14
	A4	Valorisation et conservation du patrimoine génétique	6
Organisation de l'espace	A5	Assolement	8
	A6	Dimension des parcelles	6
	A7	Gestion des matières organiques	5
	A8	Zones de régulation écologique	12
	A9	Contribution aux enjeux environnementaux du territoire	4
	A10	Valorisation de l'espace	5
	A11	Gestion des surfaces fourragères	3
Pratiques agricoles	A12	Fertilisation	8
	A13	Effluents organiques liquides	3
	A14	Pesticides	13
	A15	Traitements vétérinaires	3
	A16	Protection de la ressource sol	5
	A17	Gestion de la ressource en eau	4
	A18	Dépendance énergétique	10

Échelle de durabilité socioterritoriale

Composantes		Indicateurs	Valeurs maximales
Qualité des produits et du territoire	B1	Démarche de qualité	10
	B2	Valorisation du patrimoine bâti et du paysage	8
	B3	Gestion des déchets non organiques	5
	B4	Accessibilité de l'espace	5
	B5	Implication sociale	6
Emploi et services	B6	Valorisation par filières courtes	7
	B7	Autonomie et valorisation des ressources locales	10
	B8	Services, pluriactivité	5
	B9	Contribution à l'emploi	6
	B10	Travail collectif	5
	B11	Pérennité probable	3
Ethique et développement humain	B12	Contribution à l'équilibre alimentaire mondial	10
	B13	Bien être animal	3
	B14	Formation	6
	B15	Intensité de travail	7
	B16	Qualité de la vie	6
	B17	Isolement	3
	B18	Accueil, Hygiène et Sécurité	4

Échelle de durabilité économique

Composantes		Indicateurs	Valeurs maximales
Viabilité économique	C1	Viabilité économique	20
	C2	Taux de spécialisation économique	10
Indépendance	C3	Autonomie financière	15
	C4	Sensibilité aux aides du 1 ^{er} pilier de la politique agricole commune	10
Transmissibilité	C5	Transmissibilité du capital	20
Efficience	C6	Efficience du processus productif	25

Annexe 58 : Liste des professionnels contactés.

Organisme	Poste	Nom	Coordonnées	Localisation
<i>Professionnels de la REUT</i>				
Canal de Provence	?	Céline PAPIN	celinepapin@orange.io	Jordanie
<i>Professionnels de l'épuration</i>				
ASTEE / Veolia	?	Dominique GÂTEL	Dominique.GATEL@veoliaeau.fr	France
ARPE	Chargé de projet	Giles MALAMAIRE	g.malamaire@arpe-paca.org	04 42 90 90 81 Aix-en-Provence
Mairie de BBA	Directeur Urbanisme Grands travaux	Patrick CLAUDEL	patrick.claudet@boucbelair.com	04 42 94 93 28 Bouc-Bel-Air
SEM	Responsable de STEP de BBA	Mr. SANTACROCE		Bouc-Bel-Air
Mairie de Fuveau	Direction générale	Laurence VIC MASSOL	lvic@mairie-fuveau.com	04.42.65.65.10 Fuveau
SEM	Responsable de STEP de Fuveau	Ludovic COHEN		06 17 57 22 72 Fuveau
Canal de Provence	?	Jacques BERAUD	Jacques.BERAUD@canal-de-provence.com	Aix-en-Provence
<i>Professionnels de l'irrigation</i>				
NETAFIM	?	Christophe DERBEZ	christophe.derbez@netafim-fr.com	04 42 66 83 53 06 72 74 09 12 France
Cemagref	?	Sébastien LOUBIER	sebastien.loubier@cemagref.fr	04 67 04 63 68 Montpellier
<i>Economie de l'environnement</i>				
Cemagref	Economiste	Sylvie MORARDET	sylvie.morardet@cemagref.fr	04 67 04 63 49 Montpellier
<i>Professionnels du développement durable</i>				
GRCIVAM PACA	Animatrice-Coordnatrice	Patricia LENNE	p.lenne.civampaca@orange.fr	04 90 78 35 39 Aix-en-Provence
FNCIVAM	Direction	Véronique REBHOLTZ	veronique.rebholtz@civam.org	01 44 88 98 60 Paris
Bio de Provence	?	Didier JAMMES	didier.jammes@bio-provence.org	04 90 84 03 34 Aix-en-Provence
LEGTA	Animateur du réseau "Agronomie-Ecophyto 2018" au sein du MAAP	Philippe COUSINIE	philippe.cousinie@educagri.fr	06 07 94 19 60 Montpellier
GRCIVAM Grand-Ouest		David FALAISE	agriculture-durable@wanadoo.fr	02 99 77 39 25
Observatoire des Activités Agricoles sur les Territoires	Responsables du volet "Indicateurs et tableaux de bords"	Elodie NGUYEN	el.nguyen@picardie.chambagri.fr	Picardie
FRCIVAM Rhône-Alpes		Jean-Yves MORGANTINI	jean-yves.morgantini@educagri.fr	04 74 54 70 59 06 30 99 98 57
FRCIVAM Pays de la Loire	Animateur Régional Agriculture Durable et Garndes Cultures Economes	Alexis DE MARGUERIE	frcivampdl@free.fr	02 40 72 65 05 Saffre
FRCIVAM Limousin	Secrétaire	Brigitte ZIZARD	frcivamlimousin@wanadoo.fr	05 55 26 07 99 Naves
FRCIVAM Languedoc-Roussillon		Julie PERES	frcivamlr@wanadoo.fr	04 67 06 23 40 Lattes

Annexe 59 : Liste des personnes contactées au sein des Chambres d'Agriculture.

Organisme	Nom	Mail	Téléphone
Aquitaine			
Chambre régionale d'Aquitaine	Philippe Lansade	?	05 56 01 33 39
Chambre de Gironde	Thomas LARRIEU	t.larrieu@gironde.chambagri.fr	05 56 79 64 13
Languedoc-Roussillon			
Chambre régionale de LR	Stéphanie Balsan et Julien LECONTE	stephanie.balsan@languedocroussillon.chambagri.fr	04 67 20 88 68
Chambre de l'Aude	Jean-Michel GILLOT	jm.gillot@aude.chambagri.fr	04 68 58 13 93 06 70 75 96 32
Chambre de l'Hérault	Christophe LAFON	lafon@herault.chambagri.fr	04 67 20 88 23
Chambre du Gard	Muriel VANDERCHMITT	muriel.vanderchmitt@gard.chambagri.fr	04 66 04 50 88
	Julie CHAMBOST (<i>Chargée de la MESE, Service Environnement Territoire</i>)	julie.chambost@gard.chambagri.fr	04 66 04 50 68
Chambre des Pyrénées Orientales	Jacques FERAUD	j.feraud@pyrenees-orientales.chambagri.fr	04 68 35 74 00 (standard)
Poitou-Charente			
Chambre régionale d'agriculture PC	M.FORT	?	05 49 44 74 88
Chambre de la Charente maritime	Jean-philippe BERNARD (chef unité environnement)	jean-philippe.bernard@charente-maritime.chambagri.fr	05 46 50 45 00
PACA			
Chambre régionale d'agriculture PACA	Arnaud GAUFFIER	?	04 42 17 15 00
Chambre du Var (GC)	Rémi PECOUT	remi.pecout@var.chambagri.fr	
Chambre de Vaucluse	Anthony MUSCAT	anthony.muscat@vaucluse.chambagri.fr	
	Viviane SIBE (<i>Département Territoire et Environnement</i>)	viviane.sibe@vaucluse.chambagri.fr	04 90 23 65 50
Chambre des Bouches du Rhône	Christelle MACE		04 42 23 86 68
Chambre des Alpes maritimes	JL BELLiard	jlbelliard@alpes-maritimes.chambagri.fr	04 93 18 45 00
Chambre des Alpes de Haute Provence	Noël PITON	n.piton@ahp.chambagri.fr	04 92 30 57 57
Rhône Alpes			
CR Rhône Alpes	?	?	04 72 72 49 10
Chambre de la Loire	Bernard RIVOIRE	bernard.rivoire@loire.chambagri.fr	04 77 91 43 41
Centre			
CR pays de la Loire	Hervé MOINAUD	hervé.moinaud@pl.chambagri.fr	02 41 18 60 00
Chambre de la Vendée	Michel CHAUVIN	michel.chauvin@vendee.chambagri.fr	02 51 36 82 87
Chambre de Loire Atlantique	Caroline DOUBLET	Caroline.doublé@loire-atlantique.chambagri.fr	02 53 46 60 00
Assemblée Permanente des CA	Arnaud GAUFFIER (Recyclage)	arnaud.gauffier@apca.chambagri.fr	?

Annexe 60 : Liste des communes contactées.

Département	Ville	Capacité STEP (EH)	Milieu récepteur	Etat	Volume annuel (en 10 ³ m ³)	Surf. irriguée /an (ha)	Culture	Qualité	Traitement III	Coordonnées
Vaucluse	Oppède	1 100	Rivière le Coulon	Abouti		1			Peupleraie	04 90 76 90 06
Alpes-Maritimes	Cogolin	10 000	Fleuve la gisèle	Abouti		2,18	Forêt	C	Lagunage	04 94 56 65 45
Alpes-de-Haute-Provence	Le Revest-du-Bion	1 000	?	Abouti	80	1,5		B?	Aucun	04 92 77 22 26
Var	Iles de Porquerolles	4 300	?	Abouti	450 m ³ /j	30		B		04 94 00 78 78
	Lavandou	17 300	Mer méditerranée	Abouti	700	20-30	Espaces verts	A	Biofiltres pouzzolane	04 94 50 01 00
	Toulon-Est	107 000	Mer méditerranée	En cours						04 94 36 30 00
Gard	Alès	90 000	Rivière le Gardon d'Alès	Abouti (?)		100		B		04 66 56 11 00
	Nîmes	?		Abouti (?)			Forêts, prairies			04 66 76 70 71
Hérault	Montpellier	470 000	Mer méditerranée	Abouti						04 67 34 70 00
	Saint Mathieu de Treviers	6 000	Ruisseau le Terrieu	Abouti						04 67 55 20 28
	Saint Jean de Buèges	500	Rivière la Buèges	Abouti		1,5				04 67 73 10 64
Aude	Saint Cyprien	77 000	Mer méditerranée	Abouti						04 68 21 93 93
Pyrénées orientales	Cerbère-Peyrefitte	7 000		Abouti		3	Maquis, garrigue	C?	Biofiltre et trait. physico-chimique (II)	04 68 88 41 85
Loire	Lentigny	?		Abouti						04 77 63 13 60
Indre-et-Loire	Chanceaux sur Choisille	3 600		???						02 47 55 19 55
Loire Atlantique	Pornic	22 000	Océan Atlantique	Abouti	438	34	Golf	A	Chloration-Déchloration	02 40 82 31 11
										02 40 82 06 69
Charente-Maritime	Ars en Ré	23 000	Océan Atlantique	Abouti	3 450	73		B	Chloration	05 46 29 40 21

Annexe 61 : Liste des réutilisateurs d'eaux usées traitées contactés.

Organisme	Coordonnées	Localisation
Conserves France	04 66 38 77 34	Nîmes
Riezrie Sud Céréales Soufflet	04 90 93 60 51	Arles
GRAP'SUD	04 66 83 21 52	Cruviers Lascours
CODIVIA RHONE	04 66 61 69 89	St Christol les Alès
ASA Limagne Noire	06 08 34 27 72	Clermont Ferrand

