HAL open science

# Potentialités d'économies d'énergie et de main d'œuvre au travers de la modernisation des systèmes d'irrigation. Etude réalisée avec le soutien du Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation.

C. Serra Wittling, Bruno Molle

**To cite this version:**

C. Serra Wittling, Bruno Molle. Potentialités d'économies d'énergie et de main d'œuvre au travers de la modernisation des systèmes d'irrigation. Etude réalisée avec le soutien du Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation.. [Rapport de recherche] INRAE UMR G-EAU. 2020. hal-03169465

**HAL Id: hal-03169465**

**https://hal.inrae.fr/hal-03169465v1**

Submitted on 15 Mar 2021

**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.

# Potentialités d'économies d'énergie et de main d'œuvre au travers de la modernisation des systèmes d'irrigation

Etude réalisée avec le soutien du Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation.
La responsabilité du Ministère en charge de l'agriculture ne saurait être engagée.

*Version finale – Février 2020*

*Claire SERRA-WITTLING et Bruno MOLLE*

UMR G-EAU
361 Rue Jean-François Breton
BP 5095
34196 MONTPELLIER Cedex 5

# Résumé

Du fait des coûts engendrés, les **consommations énergétiques** constituent un élément décisif dans le choix d'une technologie lorsqu'un agriculteur envisage de moderniser son système d'irrigation et apparaissent même plus incitatrices que les économies d'eau proprement dites. Ce choix est également influencé par les coûts liés à la **main d'œuvre** pour l'irrigation C'est la raison pour laquelle le Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation a commandité la présente étude, dans le but d'aider les irrigants dans leur choix de modernisation d'équipement en lien avec les aspects énergétiques et besoin en main d'œuvre. Cette étude a pour but de produire un outil permettant d'évaluer les **économies d'énergie et de main d'œuvre potentiellement réalisables** lors d'un changement de système d'irrigation. Elle fait suite au premier volet intitulé « Evaluation des économies d'eau à la parcelle réalisables par la modernisation des systèmes d'irrigation » (Serra-Wittling et Molle, 2017).

Après une présentation synthétique les bases du concept d'efficience énergétique en irrigation et des moyens d'améliorer cette efficience, l'étude compile les résultats d'expérimentations et mesures de terrain effectuées en France sur diverses installations. Elle présente un **référentiel d'économies d'énergie réalisables** par un changement de matériel d'irrigation dans le cas d'une parcelle alimentée par un réseau collectif ou d'une parcelle alimentée par station de pompage individuelle, ainsi qu'un **référentiel d'économies de temps de main d'œuvre réalisables**.

# Table des matières

Résumé ..... 3
Liste des abréviations ..... 6
Introduction ..... 7
Contexte ..... 7
Objectifs de l'étude ..... 8
Méthodologie ..... 8
1. Qu'est-ce que l'efficience énergétique ? ..... 10
1.1. Le cheminement de l'eau et de l'énergie en irrigation ..... 10
1.1.1. Rappel : Répartition de l'eau et pertes entre les différentes étapes ..... 10
1.1.2. Répartition de l'énergie et pertes entre les différentes étapes (figure 1) ..... 12
1.2. Indicateurs de performance énergétique ..... 14
2. Comment réaliser des économies d'énergie ? ..... 16
2.1. Améliorer l'efficience de l'eau d'irrigation ..... 16
2.1.1. Réduire les pertes d'eau par les pratiques culturales ..... 16
2.1.2. Réduire les pertes d'eau en améliorant les équipements d'irrigation ..... 16
2.1.3. Réduire les pertes d'eau en améliorant la conduite d'irrigation ..... 19
2.2. Améliorer l'efficience énergétique de l'installation ..... 20
2.2.1. Pompes ..... 20
2.2.1.1. Dimensionner la pompe ..... 20
2.2.1.2. Changer la pompe ..... 20
2.2.1.3. Utiliser un variateur de vitesse ..... 21
2.2.2. Dimensionner et entretenir les canalisations ..... 23
2.2.3. Réduire l'énergie requise par le matériel d'application ..... 23
2.2.3.1. Changer de système d'irrigation ..... 23
2.2.3.2. Utiliser des asperseurs basse pression sur un pivot ..... 24
2.2.3.3. Remplacer le canon par une rampe tractée sur un enrouleur ..... 25
2.2.3.4. Choisir le diamètre de buse du canon ..... 25
2.2.3.5. Choisir le diamètre du tube d'un enrouleur ..... 26
3. Quelles références expérimentales d'économies d'énergie ? ..... 27
3.1. Parcelle alimentée par réseau collectif ..... 27
3.1.1. Données mesurées : Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne – CACG (2012-2018) ..... 27
3.1.2. Données mesurées : CEMAGREF (2009) ..... 29
3.1.3. Données calculées : Fonds Français pour l'Environnement Mondial – FFEM (2000) ... 32

3.1.4. Synthèse des données relatives aux consommations énergétiques des systèmes à la parcelle 33
3.2. Parcelle alimentée par pompage individuel ..... 34
3.2.1. CEMAGREF (2009) ..... 34
3.2.2. Volet irrigation du projet EDEN (2012-2016) ..... 37
3.2.3. Arvalis (2017) ..... 40
3.2.4. GRCETA des sols forestiers d'Aquitaine (2007) ..... 41
3.2.5. Chambre d'agriculture des Landes (2012) ..... 42
3.2.6. Chambre d'agriculture du Tarn (2014) ..... 43
3.2.7. Synthèse des données relatives aux consommations énergétiques globales des systèmes d'irrigation alimentés par station de pompage individuelle ..... 44
4. Comment réaliser des économies de main d'œuvre ? ..... 47
4.1. Grandes cultures ..... 47
4.2. Maraîchage et arboriculture ..... 49
4.2.1. Maraîchage ..... 50
4.2.2. Arboriculture ..... 52
4.3. Autres éléments liés aux économies de main d'œuvre ..... 52
4.4. Synthèse : les économies de main d'œuvre réalisables ..... 54
5. Conclusion générale ..... 57
Références bibliographiques ..... 59

# Liste des abréviations

| | |
|---|---|
| CACG | Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne |
| GGE | Goutte-à-goutte enterré |
| GGS | Goutte à goutte de surface |
| GRCETA SFA Forestiers d'Aquitaine | Groupement de Recherche sur les Cultures et Techniques Agricoles des Sols |
| kVA | kilo Volt Ampère |
| kW | kilo Watt |
| kWh | kilo Watt heure |
| mCE | mètre de colonne d'eau |
| Mtep | mégatonne équivalent pétrole |
| PE | polyéthylène |

……

# Introduction

## Contexte

En 2015, le secteur de l'agriculture (incluant la forêt et la pêche) avec 4,5 Mtep représente moins de 3 % de la consommation française d'énergie finale. Le mix énergétique est toujours largement dominé par les produits pétroliers qui représentent 75% de la consommation agricole en 2015, suivis par l'électricité (16%), électricité elle-même issue en grande partie de l'énergie nucléaire (77% contre 13% issus des hydrocarbures et 10% issus des énergies renouvelables) (MEEM, 2016). L'énergie est surtout utilisée pour les tracteurs et engins à moteur (53% de la consommation énergétique agricole totale), les bâtiments d'élevage (11%), les serres (10%). L'énergie dédiée à l'irrigation, essentiellement sous forme d'énergie électrique, ne représente que 3% de la consommation agricole totale en 2011 (MAAF, 2014).

A l'échelle de l'exploitation, le coût de l'énergie représentait en moyenne près de 5% des charges totales en 2004 (Bochu et al, 2005), ce chiffre étant plus élevé pour les exploitations pratiquant l'irrigation (Goossens, 2004). L'étude réalisée par le groupement de recherche sur les cultures et techniques agricoles des sols forestiers d'Aquitaine (GRCETA SFA) a révélé que les charges d'électricité, servant majoritairement à l'irrigation, représentaient en moyenne 40% des charges énergétiques de l'exploitation (Heredia, 2007). Cependant, ces références n'intègrent pas la hausse des tarifs de l'électricité survenue depuis. En effet, le prix du kW observé chez EDF a subi une augmentation de +13,2 % par an entre 2004 (0,036 € HT/kWh) et 2013 (0,110 € HT/kWh) sur le tarif bleu (puissance souscrite inférieure à 36 kVA). Le tarif règlementé jaune (pour des puissances souscrites supérieures à 36 kVA), qui était le plus avantageux, a laissé la place aux tarifs de marché depuis le 1er Janvier 2016 (loi NOME). Ces évolutions entraînent un alourdissement croissant de la facture d'électricité pour les irrigants. Les installations suivies dans le cadre du projet EDEN (2012-2014) présentent un coût annuel de l'énergie pour l'irrigation qui s'élève à 150 €/ha pour une consommation moyenne de 1 500 kWh/ha. Les irrigants cherchent donc à optimiser leur consommation énergétique pour maitriser leurs charges.

Dans un contexte où les prix de l'énergie sont encore attendus à la hausse, une récente étude prospective a estimé le potentiel de réduction de la demande énergétique des exploitations agricoles, par le biais de solutions déjà appliquées ou nouvelles (ADEME, 2019). Le scénario tendanciel, basé sur la diffusion des meilleures technologies disponibles, peut permettre, à productions constantes, une réduction de la consommation globale d'énergie du secteur agriculture de 17 % à l'horizon 2035 et de 26 % à l'horizon 2050. Le scénario volontariste, basé sur la Stratégie Nationale Bas Carbone (SNBC, objectif réduction de 50 % des émissions de gaz à effet de serre), permettrait une réduction de la consommation d'énergie de 23 % à l'horizon 2035 et de 43 % à l'horizon 2050. Pour l'irrigation, le scénario tendanciel engendre - à surface et volume constants - une diminution de la consommation d'énergie de 57% en 2035 et de 75% en 2050, due au développement des meilleures pratiques et technologies d'irrigation. Le scénario volontariste, malgré une augmentation des surfaces irriguées de +20% et des volumes d'eau consommés de +10%, prévoit une réduction de la consommation d'énergie de 19% en 2035 et de 40% en 2050.

Des marges de manœuvre existent donc pour réduire les **consommations énergétiques** en irrigation. Du fait des coûts engendrés, les consommations énergétiques constituent un élément décisif dans le choix d'une technologie lorsqu'un agriculteur envisage de moderniser son système d'irrigation et apparaissent même plus incitatrices que les économies d'eau proprement dites. Ce choix est également influencé par les coûts liés à la **main d'œuvre** pour l'irrigation C'est la raison pour laquelle

le Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation a commandité la présente étude, dans le but d'aider les irrigants dans leur choix de modernisation d'équipement en lien avec les aspects énergétiques et besoin en main d'œuvre.

## Objectifs de l'étude

La présente étude vient compléter le premier volet intitulé « Evaluation des économies d'eau à la parcelle réalisables par la modernisation des systèmes d'irrigation » (Serra-Wittling et Molle, 2017).

En effet, les irrigants peuvent prétendre à des aides financières européennes, sur fonds FEADER, pour leurs investissements d'hydraulique agricole, à condition que le nouveau système d'irrigation soit susceptible de permettre une économie d'eau de 5 à 25%, sans diminution du rendement des cultures. Pour cela, une évaluation *ex-ante* des économies d'eau potentielles permises par les investissements mis en œuvre doit être réalisée. L'objectif du premier volet était donc d'élaborer un outil simple qui permette aux exploitants agricoles, aux conseillers en irrigation et aux organismes instruisant les dossiers de subvention, d'évaluer *ex ante* les économies d'eau potentielles réalisables en passant d'un système d'irrigation existant à un système projeté, en fonction de la culture considérée. A partir des références collectées, un **référentiel d'économies d'eau potentiellement réalisables** par un changement de matériel d'irrigation ou de pilotage a pu être établi.

Le deuxième volet, objet de la présente étude, vise à produire un outil pour évaluer les **économies d'énergie et de main d'œuvre potentiellement réalisables** lors d'un changement de système d'irrigation. Cette étude n'a pas vocation à évaluer les impacts financiers et économiques de la modernisation des systèmes, mais bien d'évaluer les économies en quantités d'énergie et de temps de main d'œuvre.

## Méthodologie

Comme le premier volet relatif aux économies d'eau, le volet énergétique se focalise sur la modernisation des équipements d'irrigation **à la parcelle** et son impact sur la consommation énergétique de l'irrigant. Cependant, celui-ci peut également, dans certains cas, agir sur sa consommation énergétique par le biais de son système de pompage et de son réseau d'amenée. Les économies d'énergie seront donc abordées en distinguant les deux situations suivantes :

- **Parcelle alimentée par un réseau collectif** : l'irrigant ne peut influencer l'amont de son exploitation (pompage, transport). Le seul levier d'économie d'énergie dont il dispose est le choix du matériel d'irrigation à la parcelle pour la distribution et l'application, mais dans une plage de contrainte donnée par les consignes de débit, pression et tarification de l'eau du réseau collectif. On considère donc ici l'énergie consommée en entrée de parcelle (hors pompage et transport ; l'efficience énergétique et les économies d'énergie sont évaluées à l'échelle de la parcelle. Il faut remarquer que, lorsque tous les agriculteurs d'un réseau basculent vers des systèmes à plus faible pression, la pression dans le réseau peut être diminuée ; de même, l'utilisation de systèmes à plus faible débit induit des pertes de charge plus faibles donc une possibilité de baisse de pression globale du réseau. Ces diminutions de pression dans le réseau, n'étant pas du ressort de l'irrigant mais de celui du gestionnaire de réseau, ne seront pas abordées dans l'étude.
- **Parcelle alimentée par pompage individuel** (pompage en rivière ou retenue collinaire, forage) : une amélioration du matériel à la parcelle peut également s'accompagner d'une amélioration au niveau de la station de pompage et du réseau d'amenée. On considère alors l'énergie consommée par la station de pompage ; l'efficience et les économies d'énergie concernent la pompe, le réseau d'amenée ainsi que l'équipement à la parcelle.

La première partie de ce rapport présente de manière synthétique les bases du concept d'efficience énergétique en irrigation. La deuxième partie détaille les moyens d'améliorer cette efficience et le choix d'un indicateur pertinent pour comparer les performances des installations.

La troisième partie compile les résultats d'expérimentations et mesures de terrain effectuées en France sur diverses installations. Elle présente un **référentiel d'économies d'énergie réalisables** par un changement de matériel d'irrigation dans le cas d'une parcelle alimentée par un réseau collectif ou d'une parcelle alimentée par station de pompage individuelle. Il convient de souligner que la plupart des installations d'irrigation ont été mises en place alors que le coût de l'énergie était faible. Les préoccupations économiques étaient alors plutôt axées vers les charges d'investissement et temps d'amortissement. L'intérêt pour réduire la consommation énergétique est donc relativement récent et les données de performance et d'économies d'énergie encore peu nombreuses.

Enfin, la quatrième partie expose les données collectées relatives aux économies de main d'œuvre et propose un **référentiel d'économies de main d'œuvre réalisables**.

# 1. Qu'est-ce que l'efficience énergétique ?

## 1.1. Le cheminement de l'eau et de l'énergie en irrigation

Le cheminement de l'eau d'irrigation se décompose en 5 étapes depuis la source jusqu'à l'absorption par la plante (figure 1) : mise sous pression (rôle de la pompe), transport (réseau), distribution (conduites à la parcelle), application (équipement d'irrigation proprement dit) et enfin stockage dans le sol et consommation par la culture. A chaque étape peuvent avoir lieu des pertes d'eau (flèches rouges sur la figure 1) qui ont diverses origines. Par analogie, on peut suivre parallèlement le « cheminement » de l'énergie qui se répartit entre ces 5 étapes, avec les pertes énergétiques afférentes.

### 1.1.1. Rappel : Répartition de l'eau et pertes entre les différentes étapes

Ci-après sont rappelées succinctement les différentes pertes d'eau pouvant avoir lieu en amont et à l'intérieur de la parcelle, ainsi que leur origine. Pour plus de détail, se référer au premier volet de cette étude (« Evaluation des économies d'eau à la parcelle réalisables par la modernisation des systèmes d'irrigation », Serra-Wittling et Molle, 2017).

#### *1.1.1.1. Nature des pertes d'eau d'irrigation*

##### Pertes d'eau en amont de la parcelle

Il s'agit de fuites dans le réseau d'amenée (individuel ou collectif).

- Pertes liées aux organes de protection du réseau

Si le matériel de protection du réseau est obsolète ou le réglage inapproprié, des fuites peuvent avoir lieu au niveau des ouvrages hydrauliques, des points bas, des soupapes, des purgeurs d'air sur les points hauts, des vannes ou ouvrages de vidange du réseau.

- Pertes liées aux fuites

On distinguera les fuites accidentelles (donc ponctuelles) des fuites répétées. Elles sont plus ou moins facilement décelables en fonction de leurs causes (rupture de conduites, fermeture de vannes non étanches…), du fait que le réseau est apparent ou enterré et de leurs positions sur le réseau de canalisations.

##### Pertes d'eau à l'intérieur de la parcelle

- Fuites dans les équipements à la parcelle : conduites de distribution, tuyau d'un enrouleur…
- Débordement hors parcelle : dans le cas de l'enrouleur, eau perdue sur les parcelles voisines ou sur la route bordant le champ
- Evaporation directe et dérive en aspersion
- Interception par la canopée
- Ruissellement
- Drainage
- Evapotranspiration des adventices
- Eau restant dans la zone racinaire après récolte
- Evaporation du sol

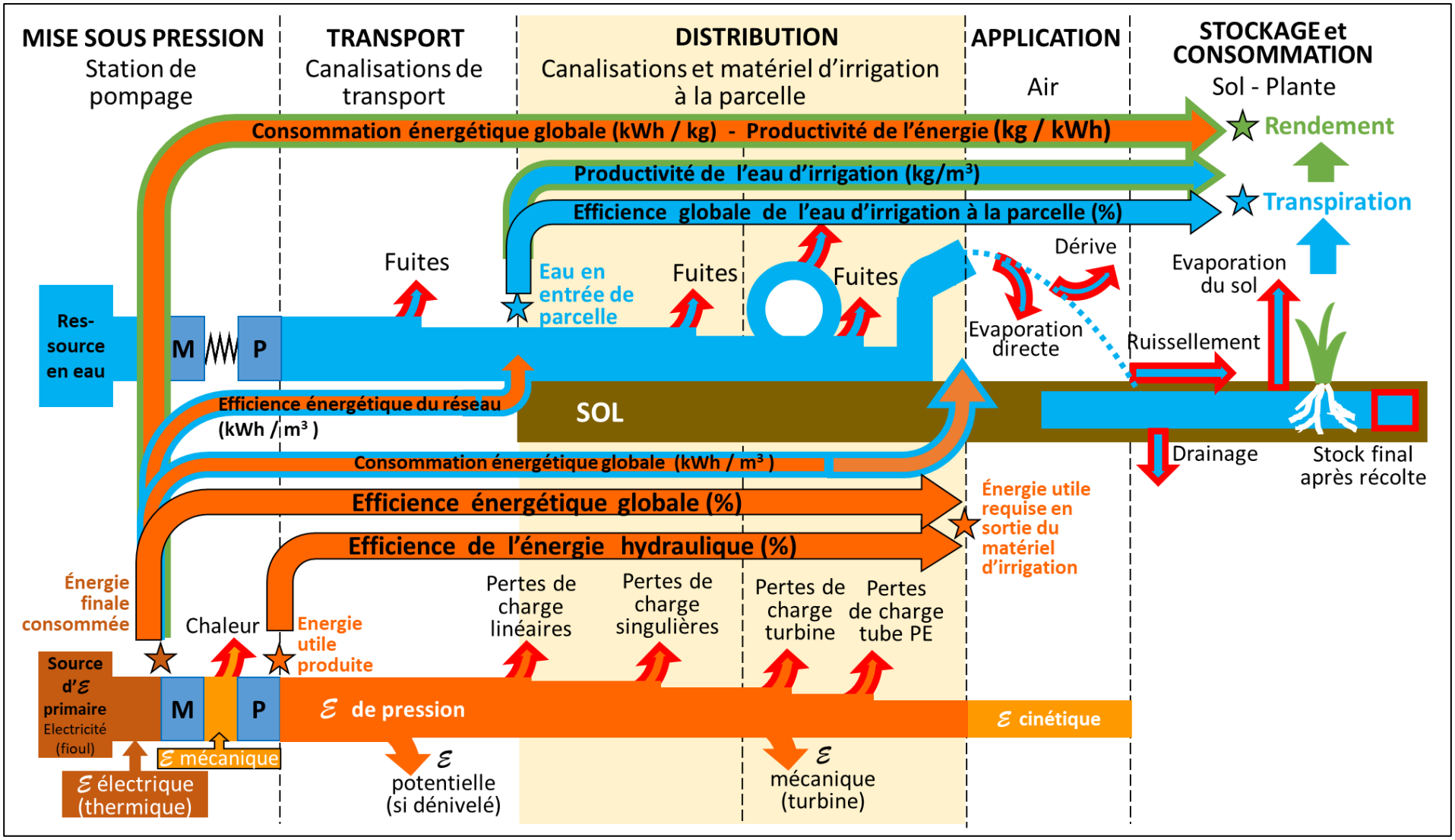


Figure 1. Etapes du cheminement de l'eau (bleu) et des formes principales d'énergie (orange) en irrigation : cas de l'aspersion par canon enrouleur. Localisation des pertes d'eau et d'énergie (flèches rouges).

#### *1.1.1.2. Origine des pertes d'eau d'irrigation*

Les pertes d'eau d'irrigation ont plusieurs origines :

- Les conditions locales : climat, sol
- La technologie du système d'irrigation et son niveau de maintenance
- Les pratiques d'irrigation : dates, horaires et doses des apports
- La culture elle-même : stades de développement
- Les pratiques culturales : date de semis, gestion des adventices, travail du sol…

### 1.1.2. Répartition de l'énergie et pertes entre les différentes étapes (figure 1)

#### *1.1.2.1. Energie finale/primaire*

L'énergie finale (électricité ou gasoil) est l'énergie consommée par la station de pompage, c'est-à-dire en fin de chaîne de distribution. C'est l'énergie facturée à l'irrigant. L'énergie primaire est la somme entre l'énergie finale et l'ensemble des pertes et des consommations des producteurs et transformateurs sur toute la chaîne de production d'énergie. En France, 1 kWh électrique final correspond à 3,22 kWh d'énergie primaire ; 1 kWh gasoil correspond à 1,30 kWh d'énergie primaire (source Ademe, dans Granier et Deumier, 2013). Afin de pouvoir comparer les consommations énergétiques de systèmes d'irrigation à source d'énergie finale différente (électricité ou gasoil), on rapporte les consommations à l'énergie primaire.

#### *1.1.2.2. Pompage (mise sous pression)*

L'énergie nécessaire à la mise sous pression, pour mobiliser l'eau, représente la plus grosse part de l'énergie d'irrigation. Dans le groupe motopompe, le moteur transforme l'énergie finale en énergie mécanique qui actionne le corps de pompe. Cette énergie mécanique est ensuite transmise à l'eau par la pompe sous forme d'énergie hydraulique, somme de l'énergie de pression (forme principale), de l'énergie potentielle et de l'énergie cinétique. Les déperditions d'énergie sous forme de chaleur au niveau du groupe motopompe sont plus importantes pour les installations thermiques (≈ 80%) que les installations électriques (≈ 45 %), en raison des rendements énergétiques plus faibles pour les pompes thermiques (15-20 % contre 50 % pour pompes électriques usagées et 70-75 % pour les pompes électriques neuves).

#### *1.1.2.3. Transport*

L'énergie nécessaire pour amener l'eau de la source jusqu'à la parcelle est l'énergie hydraulique de l'eau dans les conduites du réseau d'amenée. Les besoins en énergie lors de la phase de transport sont dus :

- *A la dénivelée.* Une part de l'énergie hydraulique est transformée en énergie potentielle qui permet à l'eau de franchir la différence de niveau entre la source et la parcelle. La quantité d'énergie nécessaire est proportionnelle à cette dénivelée.
- *Aux pertes de charge linéaires liées à la distance à parcourir et au diamètre des conduites.* La perte de charge linéaire est proportionnelle à la longueur de la conduite, proportionnelle à $Q^2$ (Q=débit) et à la vitesse de l'écoulement dans la conduite, et inversement proportionnelle à $D^5$ (D=diamètre de la conduite). Cette quantité est négligeable si on irrigue à partir d'un forage à proximité de la parcelle, mais elle pourra atteindre des valeurs importantes dans le cadre de réseaux collectifs, où les linéaires de conduite se chiffrent en km.

- *Aux pertes de charge singulières*. Dues à la présence d'un obstacle dans la conduite, elles se calculent à l'aide d'un coefficient adimensionnel qui dépend du type de singularité (coude, vanne, clapet, variation de diamètre…).

Les pertes d'énergie durant le transport sont donc très variables en fonction de la configuration du réseau (0 – 30 % environ). Elles sont en général difficilement réductibles sauf à revenir sur le dimensionnement du réseau pour réduire les vitesses d'eau.

#### *1.1.2.4. Distribution à la parcelle et application*

A la parcelle, le rôle de l'équipement est de répartir l'eau le plus uniformément possible en chaque point. Pour chaque technique employée, on distingue deux étapes : la distribution et l'application (Granier et Deumier, 2013).

**La distribution** a pour but de conduire l'eau sous pression jusqu'au matériel d'application. Elle est coûteuse en matériel, peu en énergie. Les besoins en énergie sont du même type que dans la phase de transport (dénivelée, pertes de charge). A l'intérieur du matériel d'application ont lieu également des pertes de charge linéaires (tube polyéthylène de l'enrouleur, tube du pivot…) ou singulières (turbine de l'enrouleur). De plus, dans le cas de l'enrouleur, une part de l'énergie hydraulique est convertie en énergie mécanique pour le fonctionnement de la turbine.

**L'application** amène l'eau de l'arroseur vers le sol. En aspersion, l'énergie hydraulique est convertie en énergie cinétique au niveau de la buse. Cette étape peut être énergivore selon l'équipement, notamment selon la portée souhaitée du jet en sortie d'arroseur, puisque la distance parcourue par le jet sera directement fonction de la vitesse en sortie. L'énergie cinétique est dissipée au contact du sol. En goutte-à-goutte, l'eau s'écoulant du goutteur atteint directement le sol sans nécessiter d'énergie.

L'aspersion et l'irrigation localisée n'utilisent pas le même principe pour répartir l'eau sur la parcelle, en sorte que l'énergie n'est pas ventilée de la même manière pour les deux systèmes. L'irrigation localisée développe l'étape de distribution au travers d'un important réseau de tuyaux alors que l'application demande peu d'énergie (une pression relative de l'ordre de 1 bar aux goutteurs est suffisante). L'aspersion privilégie l'étape d'application avec une pression importante (jusqu'à 8 bars) pour projeter l'eau, mais moins de tuyaux, spécialement pour le canon enrouleur à grande portée qui nécessite une énergie cinétique importante en sortie de buse. De plus, les débits différents d'un système à l'autre renforcent l'écart de consommation énergétique. En irrigation localisée l'apport d'eau est réalisé avec de faibles débits sur un temps long, alors qu'en aspersion les débits sont supérieurs et génèrent des pertes de charge plus conséquentes qui nécessitent de mobiliser une puissance supérieure, mais sur un temps plus court.

Rappelons que l'énergie hydraulique fournie par une pompe est directement proportionnelle à la pression qu'elle fournit :

$$E_{hyd}[J] = Pression\ [Pa] \times Volume[m^3]$$

Compte tenu des pertes de charge dans les réseaux et les systèmes de filtration, la pression nécessaire pour un système de goutte-à-goutte est de l'ordre de 2 à 3 bars (voire moins avec des goutteurs auto-régulants) ; elle est 2 à 3 fois plus élevée pour les canons avec enrouleur.

## 1.2. Indicateurs de performance énergétique

Il existe plusieurs indicateurs rendant compte de la **performance énergétique** d'un système d'irrigation. Les définitions de ces indicateurs sont encore relativement peu stabilisées ; lors de leur utilisation, il convient de bien préciser les termes utilisés (tableau 1).

Tableau 1. Indicateurs de performance de l'irrigation : eau (■), énergie (■) et eau-énergie (■), éventuellement en lien avec la production agricole (■)

| | EAU | ENERGIE |
|---|---|---|
| | | |
| Consommation | **Consommation en eau ($m^3$/ha)**<br>= volume d'eau en entrée de parcelle / superficie irriguée | **Consommation énergétique globale (kWh/ha)**<br>= E totale consommée / superficie irriguée |
| | | |
| Consommation | **Consommation en eau ($m^3$/kg)**<br>= volume d'eau en entrée de parcelle / rendement produit | **Consommation énergétique globale (kWh/kg)**<br>= E totale consommée / rendement produit |
| | | |
| Efficience | **Efficience globale d'irrigation (%)**<br>= volume d'eau réellement transpiré par la culture / volume d'eau en entrée de parcelle | **Efficience énergétique globale (%)**<br>= E utile requise/E totale consommée<br><br>**Efficience de l'énergie hydraulique (%)**<br>= E utile requise/E utile produite |
| | | |
| Productivité | **Productivité de l'eau d'irrigation (kg/$m^3$)**<br>= rendement produit / volume d'eau en entrée de parcelle | **Productivité de l'énergie (kg/kWh)**<br>= rendement produit / E totale consommée |
| | | |
| | **EAU - ENERGIE** | |
| Performance | **Performance énergétique globale ($m^3$/kWh)**<br>= volume d'eau appliqué / E totale consommée | |
| | | |
| Consommation | **Consommation énergétique globale (kWh/$m^3$)**<br>= E totale consommée / volume d'eau appliqué | |

La **consommation énergétique** peut être rapportée à diverses références (kWh[1] ou kWh/ha ou kWh/kg) varie en fonction du système d'irrigation, de la culture et de la dose totale d'irrigation.

L'**efficience** est un ratio de type « output/input ». Dans l'étude relative aux économies d'eau et à l'efficience de l'irrigation (Serra-Wittling et Molle, 2017), le terme efficience, exprimé en %, a été

[1] 1 kWh= 3600 000 J

réservé aux ratios entre deux volumes d'eau d'irrigation « volume en sortie/apport en entrée ». A titre d'exemple, l'**efficience globale d'irrigation** y est définie comme le rapport « volume d'eau réellement transpiré par la culture / volume d'eau en entrée de parcelle ». Pour faire le parallèle avec cette étude on exprimera ici l'**efficience énergétique** à proprement parler comme un rapport de deux quantités d'énergie, par exemple (voir figure 1) :

- L'**efficience de l'énergie hydraulique** (%) = Energie utile requise/Energie utile produite

Cette efficience est aussi parfois appelée « énergie utile » (Heredia, 2007). Lorsqu'elle est considérée à l'échelle du réseau en amont de la parcelle (Energie utile requise en entrée de parcelle/Energie utile produite), elle rend compte de la qualité du dimensionnement de la pompe et du réseau, y compris de son encrassement, voire du vannage pour limiter les contraintes de surpression.

- L'**efficience énergétique globale** (%) = Energie utile requise/Energie totale consommée

Elle traduit la performance du réseau complet, y compris le rendement de la pompe, c'est-à-dire la capacité du réseau à utiliser l'énergie finale pour répartir l'eau à la parcelle.

De même, comme pour la productivité de l'eau, la **productivité de l'énergie** sera exprimée comme le rapport entre le rendement agricole obtenu (kg par exemple) et la quantité d'énergie nécessaire à l'irrigation.

Enfin, des indicateurs de performance lient les deux aspects **eau et énergie** et représentent la signature eau-énergie du système ainsi que la qualité de sa conception :

- La **consommation énergétique globale** en kWh/m$^3$ traduit la quantité d'énergie nécessaire à l'installation pour appliquer 1 m$^3$ d'eau à la parcelle.
- La **performance énergétique globale** en m$^3$/kWh exprime le nombre de m$^3$ d'eau appliqués grâce à 1 kWh consommé. Ce rapport est l'inverse du rapport de consommation énergétique globale ci-dessus.

Pour tous les indicateurs, l'énergie totale consommée peut être considérée à différents niveaux de l'installation hydraulique : énergie finale (à l'entrée de la pompe), énergie utile produite (en sortie de pompe), ou énergie à la parcelle (en entrée de parcelle).

**L'indicateur de performance retenu pour la suite de la présente étude est la consommation énergétique globale exprimée en kWh/m$^3$ car il est indépendant de la culture et des conditions climatiques de l'année considérée, et permet de comparer deux systèmes à volume appliqué égal.** Néanmoins, il est évident qu'une efficience en eau d'irrigation élevée induit un besoin en eau plus faible, donc une consommation énergétique plus faible puisque la consommation énergétique est proportionnelle au volume pompé.

# 2. Comment réaliser des économies d'énergie ?

## 2.1. Améliorer l'efficience de l'eau d'irrigation

L'énergie nécessaire pour mettre en pression et transporter un volume d'eau perdu, est également de l'énergie perdue. Toute action visant à réduire les pertes en eau d'irrigation permet de réaliser des économies d'énergie.

### 2.1.1. Réduire les pertes d'eau par les pratiques culturales

Citons ici quelques exemples de pratiques qui visent à :

- Augmenter le volume d'eau disponible dans le sol : couverture du sol, conservation ou apport de matières organiques…
- Décaler les stades de développement des cultures les plus sensibles au déficit hydrique en dehors des périodes de sécheresse : esquive, choix de variétés précoces, avancée de la date de semis…

### 2.1.2. Réduire les pertes d'eau en améliorant les équipements d'irrigation

#### *2.1.2.1. Améliorer les systèmes d'aspersion*

##### L'uniformité de l'application

Une mauvaise uniformité peut être due à un mauvais dimensionnement de l'installation entraînant des écarts de débit, à une variation des conditions hydrauliques de fonctionnement, aux conditions ventées, au colmatage. Elle est à l'origine de zones sous et sur-irriguées dans la parcelle et provoque des pertes localisées par ruissellement et/ou drainage. Plusieurs études sur différents systèmes d'aspersion montrent qu'il est important de veiller au soin à apporter aux réglages et à l'entretien des équipements afin de maintenir une uniformité d'application satisfaisante et limiter les pertes. Afin de réduire les zones sous-irriguées dues à une mauvaise uniformité, l'agriculteur est amené à apporter plus d'eau. Les volumes transportés et appliqués sont alors plus importants, d'où une énergie nécessaire plus importante.

##### Choix de la période d'application

Dans un objectif de réduction des pertes par évaporation directe, il est recommandé d'éviter d'irriguer durant la plage horaire 12-16 h, plage sur laquelle la température, le rayonnement et surtout le vent sont le plus élevés. Pour limiter les pertes par dérive, l'aspersion est déconseillée en journées fortement ventées, de même que durant la plage horaire de vent thermique (12-18 h).

##### Les systèmes de modulation des doses : régulation de l'avancement et modulation de l'ouverture des buses

Tous les enrouleurs sont aujourd'hui équipés en série d'un système de **régulation électronique de l'avancement**, destiné à assurer l'application d'une dose constante tout au long de la bande arrosée. Ce système trouve son équivalent sur pivot ou rampe frontale, et permet de programmer des doses différentes par zone de parcelle (zones rectangulaires dans le cas d'une rampe ou d'un enrouleur, zones en secteurs dans le cas d'un pivot). Un autre système, encore peu développé, existe sur pivot : la **modulation de l'ouverture des buses,** connue sous le nom de VRI (Variable Rate Irrigation), qui permet également de moduler les doses. Ces deux techniques de modulation intra-parcellaire des doses peuvent être utilisées en irrigation de précision, afin d'adapter la dose à l'hétérogénéité d'une parcelle (variabilité de la réserve utile du sol, de la densité de semis, du développement de la culture…).

Elles permettent ainsi de réduire les pertes par drainage profond dans les zones qui seraient autrement sur-irriguées.

#### Systèmes de type brise-jet ou angles réglables sur canons

L'objectif est d'éviter les pertes en eau par débordement hors de la parcelle ciblée (routes ou parcelles voisines). Dans le système **brise jet**, des pointes pénètrent dans le jet pour en réduire la portée en début ou en fin de position. Le système d'**inversion du balayage** permet de faire fonctionner le canon « dos à la route » en début de position, puis de le retourner automatiquement pour le reste de son passage. Le système d'**ajustement de l'angle de balayage en cours d'enroulement** limite les débordements parallèlement à la position et est capable de modifier le réglage de secteur en cours d'enroulement.

#### Arroseurs basse-pression sur pivot et rampe frontale

Installés à la place des traditionnels sprinklers, ces arroseurs rotatifs ou oscillants présentent la particularité de fonctionner à faible pression (0,5 à 1,5 bar selon les modèles contre 3 et plus pour les sprinklers). Ils assurent une bonne homogénéité d'application, génèrent de grosses gouttes, ce qui les rend moins sensibles aux pertes par évaporation directe et par dérive due au vent, mais peut poser des problèmes liés à l'intensité d'arrosage.

#### Cannes de descentes sur pivot et rampe frontale

Le montage des arroseurs basse pression sur des cannes de descentes permet d'appliquer les gouttes plus près de la canopée et de la surface du sol, ce qui réduit la longueur de leur trajectoire et limite encore les pertes par évaporation directe et par dérive due au vent.

##### *2.1.2.2. Améliorer les systèmes d'irrigation localisée*

#### L'uniformité d'application

Elle est fonction de la qualité de la conception, en particulier des choix faits en termes de longueur de rampes et de diamètres qui induira des pertes de charge plus ou moins importantes. A noter qu'une variation de la pression en tête d'installation peut induire de fortes variation d'uniformité de distribution. Le vieillissement des installations reste le principal facteur de baisse d'uniformité du fait des dépôts et précipitations qui peu à peu obstruent canalisations et goutteurs.

#### Choix des goutteurs

Le choix de goutteurs à compensation de pression est à raisonner en fonction de la longueur des rampes et du relief de la parcelle. On veille à garder un niveau de pertes de charge acceptable en restant en dessous de 2 à 3m/s de vitesse d'eau en tête de lignes.

#### L'automatisation et le pilotage

Les options sont nombreuses dans ce domaine et permettent le suivi à distance ou le lancement de procédures de nettoyage sans intervention directe, ce qui économise du temps et beaucoup de carburants pour les véhicules des exploitations.

#### La maintenance

Elle est un facteur crucial du maintien de la performance des systèmes. En premier lieu le nettoyage du filtre doit être régulier et si possible automatisé pour éviter des pertes de charge excessives liées à l'accumulation de particules. Un nettoyage régulier des canalisations et goutteurs (injection de chlore ou autre oxydant, passage d'acide...) limite les risques de bouchage qui induisent des baisses de débit,

donc d'uniformité. L'agriculteur réagit en général en augmentant les temps d'arrosage pour compenser les manques d'eau.

#### La détection et réparation des fuites

Les possibilités de fuites sont nombreuses (pincement, insectes, oiseux, gibier) et doivent être détectées et réparées, sous peine de pertes d'eau qui deviennent vite importantes. Le suivi des paramètres hydrauliques permet de détecter assez rapidement ce genre d'accidents.

#### *2.1.2.3. Changer le système d'irrigation*

Le système peut être renouvelé à l'identique. L'efficience est alors souvent améliorée, en raison de l'érosion des performances des matériels dues au vieillissement (Molle et al, 2009) : fuites, diminution de l'uniformité d'application, colmatage des goutteurs ou micro-asperseurs. A titre d'exemple, un renouvellement de busage sur un pivot ou une rampe peut entraîner une économie d'eau de 5% (Molle, 1998).

Le choix peut également être fait de basculer vers un autre type de système qui génère moins de pertes, donc plus efficient.

Ainsi, passer d'un enrouleur à une rampe (pivot ou rampe frontale) équipée d'asperseurs basse pression permet de réduire les pertes par évaporation directe, dérive et débordement, d'autant plus en présence de cannes de descente. La rampe permet également d'améliorer l'uniformité d'application, donc de limiter les pertes par ruissellement et drainage, et de moduler plus facilement les apports en fonction des besoins de la culture. De même, en basculant d'un système d'aspersion vers le goutte-à-goutte, on supprime totalement les pertes par évaporation directe, dérive, débordement et ruissellement, et même les pertes par évaporation du sol dans le cas du goutte-à-goutte enterré.

Le premier volet de l'étude (« Evaluation des économies d'eau à la parcelle réalisables par la modernisation des systèmes d'irrigation », Serra-Wittling et Molle, 2017) a permis d'établir un référentiel d'économies d'eau potentiellement réalisables par un changement de matériel d'irrigation (sous réserve de pratiques optimales) (tableau 3).

Tableau 3. Economies d'eau potentiellement réalisables par un changement de matériel d'irrigation (Serra-Wittling et Molle, 2017)

**MAÏS ET AUTRES GRANDES CULTURES**

| économie d'eau (%) ➡ | **Nouveau** | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Ancien** | Enrouleur | Couverture intégrale | Pivot basse pression | Goutte-à-goutte de surface | Goutte-à-goutte enterré |
| Enrouleur | 10 | 10 | 5 - 20* | 10 - 20* | 15 - 35* |
| Couverture intégrale | -- | 10 | 5 - 20* | 15 - 25* | 20 - 25* |
| Pivot / Rampe | -- | -- | 5 - 10 | 5 - 15 | 10 - 25 |
| Goutte-à-goutte de surface | -- | -- | -- | 10 - 20 | 15 - 20 |
| Goutte-à-goutte enterré | -- | -- | -- | -- | 10 - 20 |

**ARBORICULTURE**

| économie d'eau (%) ➡ | **Nouveau** | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Ancien** | Aspersion sur frondaison | Aspersion sous frondaison classique | Aspersion sous frondaison Microjet | Goutte-à-goutte de surface | Goutte-à-goutte enterré |
| Aspersion sur frondaison | 10 | 10 | 15 - 30* | 20 - 35* | 25 - 35* |
| Aspersion sous frond Microjet | -- | -- | 10 - 20 | 15 - 25 | 15 - 30 |
| Goutte-à-goutte de surface | -- | -- | -- | 10 - 20 | 5 - 15 |
| Goutte-à-goutte enterré | -- | -- | -- | -- | 10 - 20 |

**MARAICHAGE DE PLEIN CHAMP**

| économie d'eau (%) ➡ | **Nouveau** | | |
|---|---|---|---|
| **Ancien** | Couverture intégrale | Mini-aspersion | Goutte-à-goutte de surface |
| Couverture intégrale | 10 | 5 - 10* | 5 - 15* |
| Mini-aspersion | -- | 10 - 20 | 10 - 30 |
| Goutte-à-goutte de surface | -- | -- | 10 - 20 |

* augmenter les valeurs hautes et basses des intervalles de +5 en région ventée

#### *2.1.2.4. L'automatisation*

La commande manuelle des vannes est susceptible d'occasionner des pertes par drainage liées à des durées excessives d'arrosage. Cela peut être le cas, par exemple, d'une vanne ouverte en fin de journée puis refermée seulement au petit matin. Le volume d'eau apporté peut être supérieur à la capacité de rétention du sol et l'excédent est perdu par drainage.

L'automatisation, c'est-à-dire la programmation de l'ouverture et de la fermeture des vannes d'irrigation, permet d'irriguer potentiellement 24H/24. Il est ainsi possible de s'affranchir des contraintes horaires de manipulation manuelle de vannes et d'éviter les apports excessifs et les pertes par drainage.

### 2.1.3. Réduire les pertes d'eau en améliorant la conduite d'irrigation

Réduire les pertes par la conduite de l'irrigation consiste à raisonner les dates et doses d'apport afin de limiter au maximum les pertes par ruissellement, drainage et stock d'eau d'irrigation dans la zone racinaire après récolte. Le pilotage de la conduite de l'irrigation peut se faire à l'aide de bulletins de conseil à l'irrigation. Peuvent également être utilisés des capteurs (sol ou plante), et éventuellement

des outils d'aide à la décision basés sur ces données de capteurs, sur les données météo, sur des modèles de bilan hydrique ou modèles de culture.

Le tableau 4 présente les économies d'eau potentiellement réalisables par l'acquisition et l'utilisation d'un matériel de pilotage (capteurs sol, capteurs plantes, cartographie de sol et modèle de bilan hydrique).

Tableau 4. Economies d'eau potentiellement réalisables par l'acquisition et l'utilisation d'un matériel de pilotage (en comparaison d'une irrigation sans matériel de pilotage) (Serra-Wittling et Molle, 2017)

| | Tensiomètres Sondes capacitives | Tensiomètres + dendromètre | Cartographie de sol + logiciel |
|---|---|---|---|
| **AUTRES GRANDES CULTURES** | | | |
| | 15 - 40 | -- | 20 - 35 |
| **ARBORICULTURE** | | | |
| | 10 - 20 | 15 - 30 | |
| **MARAICHAGE DE PLEIN CHAMP** | | | |
| | 15 - 40 | -- | |

## 2.2. Améliorer l'efficience énergétique de l'installation

Il s'agit d'améliorer les caractéristiques hydrauliques de l'installation afin de **réduire les pertes énergétiques**.

### 2.2.1. Pompes

#### 2.2.1.1. Dimensionner la pompe

Contrairement aux pompes d'exhaure (de la source vers bassin de reprise), les pompes de gavage (de la source vers la parcelle) et les pompes de reprise (du bassin de reprise vers la parcelle) sont directement reliées au système d'irrigation à la parcelle. Dans le but d'optimiser les performances énergétiques d'une installation, la (les) pompe(s) doit(doivent) être dimensionnée(s) en fonction de la demande en énergie du système à la parcelle. La pompe optimale est celle qui consommera le moins d'énergie finale sur la saison d'irrigation.

Un indicateur couramment utilisé pour informer sur la qualité du dimensionnement des pompes est **l'efficience de l'énergie hydraulique**, encore appelée **efficience utile** (Heredia, 2007) définie comme le ratio entre l'énergie utile requise (en entrée de parcelle) et l'énergie utile produite (part de l'énergie consommée transmise par la pompe à l'eau refoulée) (voir § 1.2. Indicateurs de performance énergétique). Une faible efficience utile indique une production d'énergie par la pompe trop élevée par rapport à l'énergie requise par le système d'irrigation. Elle révèle l'encrassement des conduites ou la pratique du vannage (fermeture partielle de la vanne en sortie de pompe pour adapter le débit au besoin du système d'irrigation). Un changement de pompe ou l'utilisation d'un régulateur de pression peut alors être préconisé.

#### 2.2.1.2. Changer la pompe

Renouveler une ancienne pompe par une nouvelle permet d'améliorer les rendements hydrauliques dégradés de l'ancienne pompe. Il s'agit de changer la partie moteur de la pompe et/ou la partie roue à aubage.

Dans le cadre du projet EDEN, une installation d'irrigation a été étudiée chez un agriculteur dont l'ancienne pompe n'était plus adaptée. Le système d'irrigation était une couverture intégrale sur 8,5 ha. Sur la campagne 2013, la dose d'irrigation était de 400 mm environ sur maïs, soit une consommation en eau totale de 34 220 $m^3$. L'ancienne pompe électrique (Jeumont MEN 65 FM 4 C-L, débit 30 $m^3$/h, pression 11 bars) a été remplacée par une nouvelle pompe électrique (Weir Pumps Ltd, débit 60 $m^3$/h, pression 4,7 bars). Le coût de la nouvelle pompe était d'environ 9 000 €.
Comme le montre le tableau 5, le changement de pompe a permis une économie d'énergie sur la campagne 2013 d'environ 45% (Ademe, 2019).

Tableau 5. Economie d'énergie permise par un changement de pompe

| | Consommation électrique (kWh) | Consommation (kWh/$m^3$) | Coût énergétique (€) [avec 0,15 €/kWh] |
|---|---|---|---|
| Estimation avec l'ancienne pompe | 21 661 | 0,63 | 3 249 |
| Nouvelle pompe en 2013 | 11 758 | 0,34 | 1 763 |
| Economie sur la campagne 2013. | 9 903 **(46 %)** | 0,29 **(46 %)** | 1 486 |

### 2.2.1.3. Utiliser un variateur de vitesse

*Principe*

Le variateur de vitesse, également appelé variateur de fréquence, permet de faire varier la fréquence du courant, donc la vitesse de rotation du moteur électrique de la pompe. Il présente un intérêt dans le cas d'installations à débits ou pressions demandés variables car d'une part il translate la courbe de pompe vers le bas (figure 2) (Arvalis, 2017), d'autre part il permet de choisir le régime de fonctionnement qui maximise le rendement énergétique de la pompe. La courbe verte représente l'utilisation de la pompe sans variateur de vitesse, avec un débit nominal de 175 $m^3$/h et une pression de 155 mCE. Si la demande en débit diminue à 150 $m^3$/h, sans variateur, l'irrigant est amené à vanner pour « remonter » la courbe verte et atteindre une pression de 175 mCE. Avec le variateur de vitesse (courbe orange), le vannage n'est pas nécessaire et la pression délivrée pour un débit de 150 $m^3$/h est de 135 mCE, d'où une économie d'énergie.

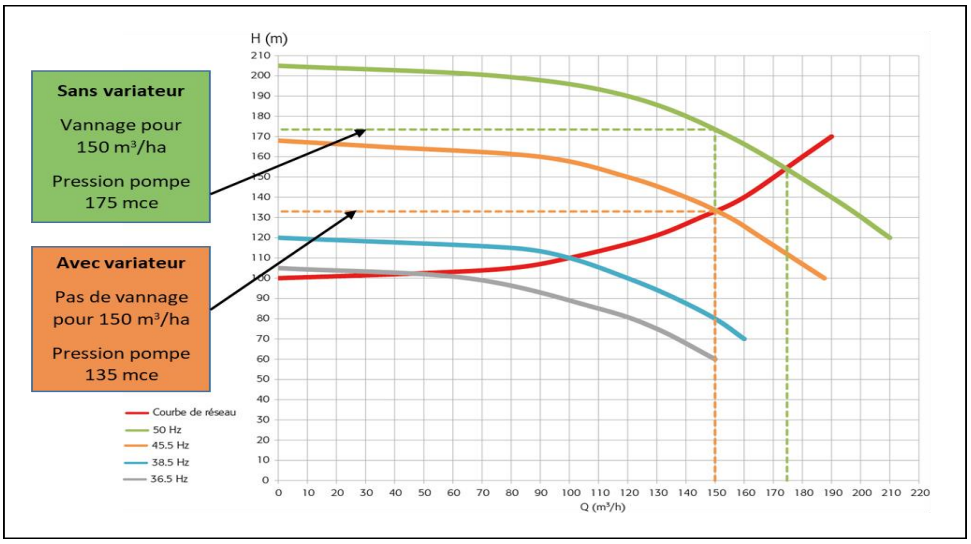


Figure 2. Variateur de vitesse d'une pompe (Source : Arvalis, 2017)

*Etude de cas*

Des travaux conduits par IRSTEA et ARVALIS ont mis en évidence l'intérêt que pourrait avoir un variateur de vitesse dans le cas de parcelles en pente irriguées par enrouleur. Le suivi instrumenté d'une installation d'irrigation a été réalisé sur une parcelle dans les coteaux du Gers (Dejean, 2016). La parcelle est arrosée depuis le haut avec l'enrouleur en haut et le canon en bas. Les six postes (ou positions) sont visibles sur la figure 3. Les postes 1 et 2 sont les plus longs (environ 378 et 367 mètres) ; le dénivelé y atteint 20 mètres. Sur ces postes, l'irrigant change la buse au canon et place une buse plus petite de 0,8 pouces (ou 20,3 mm) car la pompe ne permet pas de délivrer assez de pression et débit pour un bon fonctionnement du canon enrouleur sur la fin d'enroulement. Sur les postes 3 à 6 la buse au canon est une buse plus grosse de 0,9 pouces (ou 22,9 mm).

Pour ce canon enrouleur et ces buses de débit 40 $m^3/h$, une plage de pression entre 4,5 bars et 6 bars au canon est souhaitable. Or, sur les postes à fort dénivelé, on observe (figure 4) des pressions au canon qui atteignent 7,5 bars (75 mCE). Pour les pressions en entrée d'enrouleur et après turbine on remarque un écart de pression lié au fonctionnement de la turbine s'élevant à 5 mCE en début d'enroulement et 1 à 2 mCE en fin d'enroulement.

Cette surpression au canon sur la durée du poste, d'autant plus élevée que le dénivelé est important, génère un mauvais fonctionnement du canon (portée variable donc mauvaise répartition de l'eau) et une perte d'énergie pourrait être économisée au pompage. Pour cela il faudrait adapter la consigne de pression de pompage au besoin de pression au canon (avec une réduction de 20 mCE au démarrage de certains postes) par un dispositif d'asservissement et de télétransmission à concevoir sur une variation de vitesse au groupe de pompage. L'estimation du gain énergétique que permettrait un dispositif de régulation de la pression au pompage (variateur de fréquence) asservi à la mesure de pression au canon montre une **économie d'énergie potentielle de près de 30%,** associée à une économie d'eau de 7% (Dejean, 2016). Cependant, le calcul économique montre que l'investissement pour ce dispositif ne serait amorti qu'en 7 à 14 ans selon le tarif du kWh.

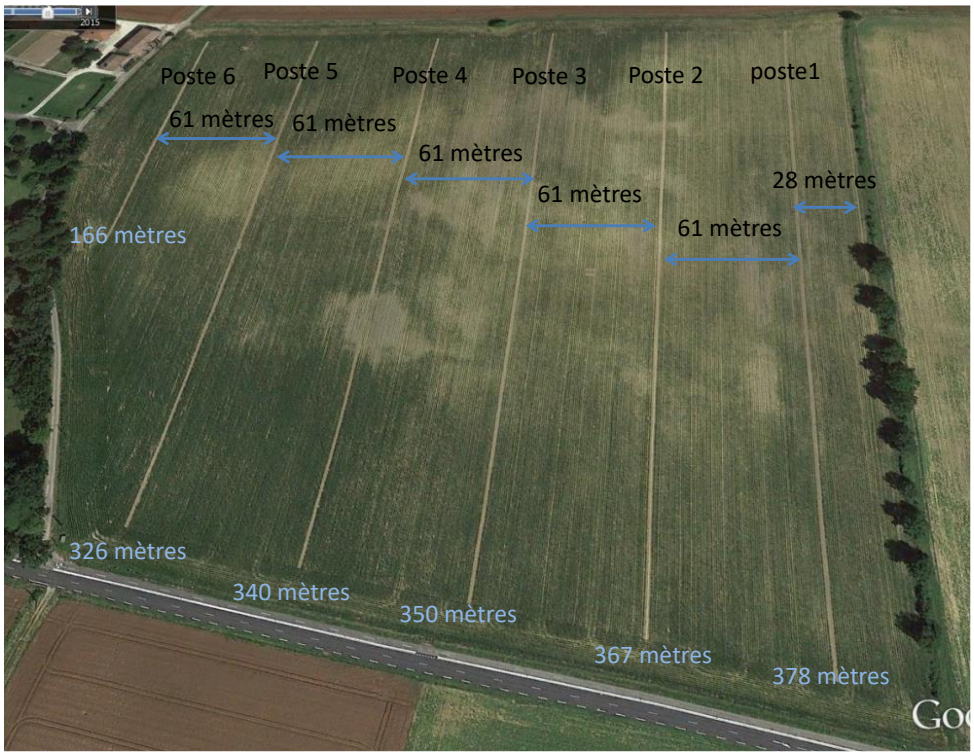


Figure 3. Parcelle étudiée et postes d'irrigation de l'enrouleur

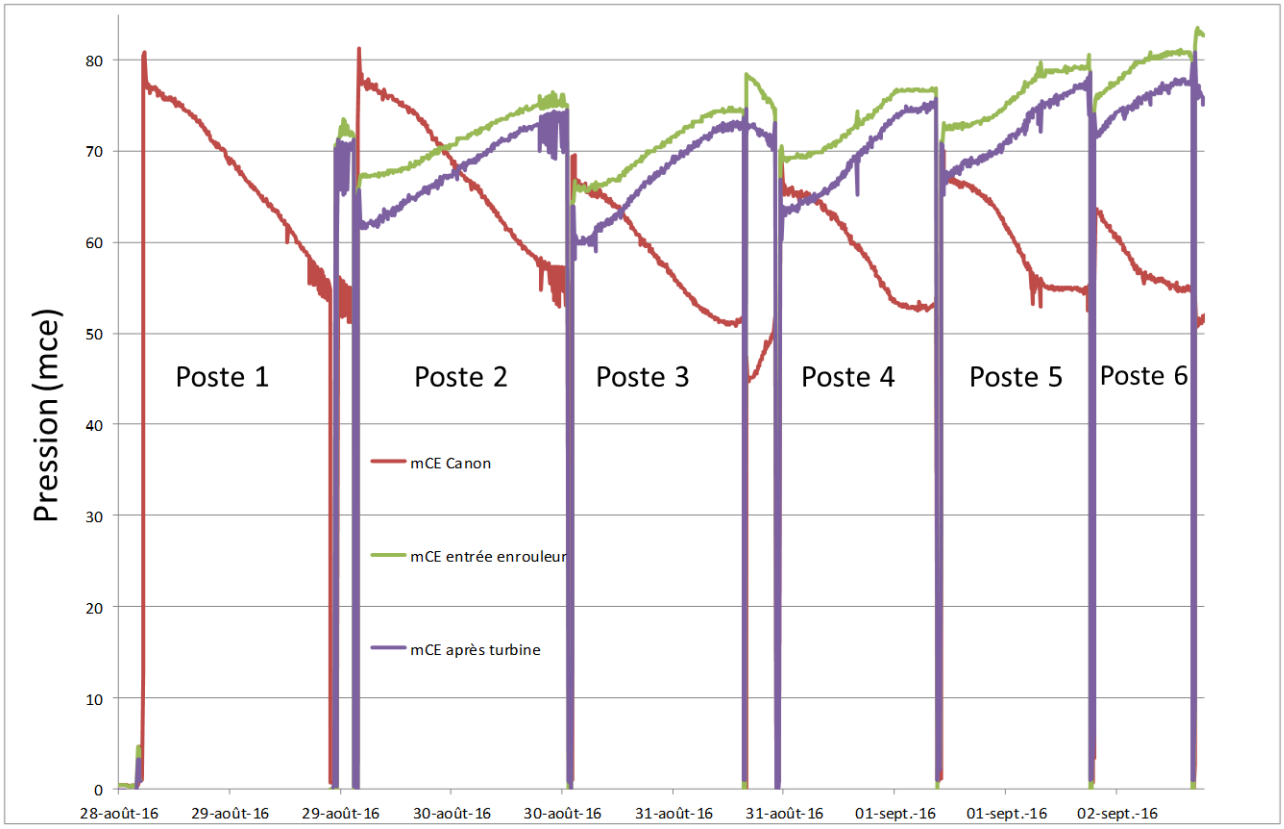


Figure 4. Suivi des pressions (en mCE) en entrée d'enrouleur, après la turbine et au canon

### 2.2.2. Dimensionner et entretenir les canalisations

Il convient d'une part de veiller au bon dimensionnement des canalisations et d'autre part de lutter contre leur encrassement. Un diamètre sous-dimensionné entraîne des pertes de charge qui pourraient être évitées ; il est important de raisonner les diamètres des canalisations en fonction des débits. Par ailleurs, l'encrassement, en réduisant le diamètre intérieur, est également à l'origine de pertes de charges supplémentaires. Ainsi, dans les Landes, le phénomène d'encrassement des conduites et des tubes de pivots par d'épaisses couches d'oxydes de fer est connu pour diminuer les performances énergétiques des installations. Un nettoyage régulier des canalisations et tubes est alors préconisé pour prévenir et remédier à ces dysfonctionnement (Heredia, 2007).

### 2.2.3. Réduire l'énergie requise par le matériel d'application

L'énergie requise en sortie du matériel d'application (ou pression de fonctionnement ou pression de service) varie selon le type de distributeur, en lien avec le débit d'équipement. Plus l'énergie requise est faible, moins l'énergie utile que doit fournir la pompe est importante et plus la consommation énergétique est réduite.

#### 2.2.3.1. Changer de système d'irrigation

Les ordres de grandeurs par exigences croissantes de pression sont les suivants (Arvalis 2017) : goutte-à-goutte et micro-irrigation 1 à 3 bars ; pivot/rampe 3 à 6 bars ; couverture intégrale 6 à 7 bars ; enrouleur 7 à 10 bars. La pression d'un enrouleur ne peut être réduite, sous peine d'une mauvaise répartition et d'une diminution de la portée qui nécessiterait un surcroît de main d'œuvre. Pour le

pivot/rampe, une marge de manœuvre est possible par changement de busage (voir ci-dessous).

Ainsi, des économies d'énergie sont possibles en adoptant un système d'irrigation moins énergivore. Les ordres de grandeur sont résumés dans le tableau 6. Cela suppose alors que la pression dans le réseau soit réduite grâce à un changement de pompe.

Tableau 6. Ordres de grandeur des économies d'énergie réalisables, d'après Ademe (2019). Moyenne (min-max).

| **Economie d'énergie (%)** ➡ | Pivot/rampe | Goutte-à-goutte |
|---|---|---|
| Enrouleur | 40% (30-50) | 70% (60-80) |
| Couverture intégrale | | 50% (40-60) |
| Pivot/rampe | | 30% (10-50) |

### 2.2.3.2. Utiliser des asperseurs basse pression sur un pivot

La pression de fonctionnement d'un pivot varie de 3 à 6 bars, voire 8 bars. Il est possible de remplacer les asperseurs Sprinklers traditionnels (ou arroseurs à impact) par des asperseurs nécessitant moins de pression pour un débit équivalent ou supérieur, assurant une bonne répartition de l'eau pour une consommation énergétique minimale, comme les Rotators (3,5-4 bars), les Sprays (1,3-2,7 bars), ou les Wobblers (0,5-2 bars).

Le canon d'extrémité du pivot exige une pression en entrée supérieure, par exemple 4 bars, alors que le système pourrait fonctionner à 2 bars avec les asperseurs de type Spray ou Wobbler. Un surpresseur installé en extrémité de pivot permet d'assurer la portée du canon ; le niveau de pression requise en entrée de pivot est alors deux fois inférieure grâce au surpresseur. En moyenne, l'économie d'énergie lors du passage d'arroseurs à impact à des asperseurs oscillants est estimée à 30 % (de 15 à 90 %) (Ademe, 2019). Le tableau 7 illustre un exemple de changement de busage avec utilisation d'un surpresseur pour une économie d'énergie réalisée de 38%.

Tableau 7. Comparaison des consommations énergétiques de deux pivots : avec asperseurs traditionnels et asperseurs basse pression, d'après Heredia (2007)

| Configuration | Sprinklers ou Rotators<br>Sans surpresseur | Sprays ou Wobblers<br>Avec surpresseur |
|---|---|---|
| Pression requise au canon | 3,6 bars | 3,6 bars |
| Pression en entrée de pivot | 4,1 bars | 2 bars |
| Surpresseur :<br>Pression délivrée | -- | 2,1 bars |
| Pompe de reprise :<br>Pression délivrée | 4,3 bars | 2,2 bars |
| Pompe de reprise :<br>Energie consommée | 0,18 kWh/m$^3$ | 0,09 kWh/m$^3$ |
| Puissance électrique en fonctionnement | 34 kWh | 21 kWh |
| Consommation énergétique | 0,18 kWh/m$^3$ | 0,11 kWh/m$^3$ |
| **Economie d'énergie** | **--** | **39 %** |

### 2.2.3.3. Remplacer le canon par une rampe tractée sur un enrouleur

La mise en place d'une rampe en bout d'enrouleur permet de réduire la taille des gouttes et la prise au vent de l'enrouleur et ainsi améliorer l'efficience d'application. Ce système permet de réduire la pression de fonctionnement en entrée d'enrouleur. On estime à 15-30% le gain d'énergie réalisé avec une rampe tractée sur enrouleur par rapport à un canon enrouleur. Il faut remarquer que, sur de longs enrouleurs (supérieurs à 500 m de longueur de polyéthylène), la turbine nécessite parfois une pression d'entrée plus importante que celle dont la rampe aurait besoin, ce qui nécessite la mise en place d'un limiteur de pression à l'entrée de la rampe et réduit les gains potentiels d'économie d'énergie (Arvalis, 2017).

### 2.2.3.4. Choisir le diamètre de buse du canon

Les buses de gros diamètre sont utilisées car elles augmentent le débit et permettent de diminuer le temps d'application, donnant de la souplesse dans l'organisation du travail en saison d'irrigation. Cependant, elles entraînent des pertes de charge plus importantes, donc une consommation énergétique supérieure.

Des travaux réalisés par la Chambre Régionale d'Agriculture d'Alsace (Arvalis, 2017) ont permis de suivre la consommation énergétique d'enrouleurs thermiques équipés de quatre tailles de buse différentes (27,5 mm, 30 mm, 32,5 et 35 mm) pour une pression constante de 5 bars et un tour d'eau de 30 mm (figure 5). L'objectif était de chiffrer l'impact du diamètre de la buse sur la consommation énergétique. Pour l'enrouleur 110/400, une augmentation de la buse de 27,5 à 32,5 mm accroît la consommation de fuel de 13 L/ha, soit une **économie d'énergie de 36%** en diminuant le diamètre de la buse de 32,5 à 27,5 mm. Pour l'enrouleur 140/500, la consommation est accrue de 5 L/ha, soit une **économie d'énergie de 18%** en diminuant la buse. Dans une optique d'économie d'énergie, il apparaît donc important d'adapter la taille de la buse à l'enrouleur.

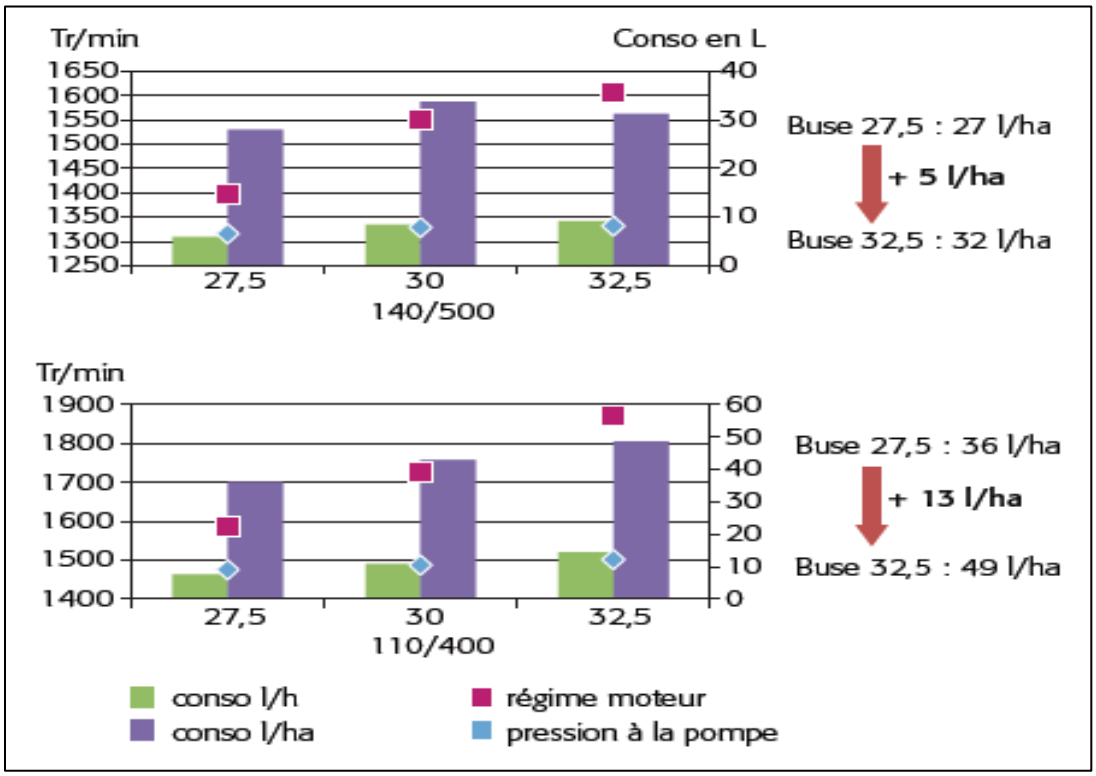


Figure 5. Impact du diamètre de la buse sur la consommation en fuel d'un enrouleur thermique (Source : Chambre Régionale d'Agriculture d'Alsace ; Arvalis, 2017)

### 2.2.3.5. Choisir le diamètre du tube d'un enrouleur

La Chambre Régionale d'Agriculture d'Alsace a également étudié, sur les enrouleurs décrits précédemment, l'influence du diamètre du tube polyéthylène sur la consommation énergétique. Comme pour les canalisations d'amenée, plus le diamètre intérieur du tube est faible, plus les pertes de charge, et par conséquent la consommation énergétique, sont importantes.

La figure 6 montre que, pour une dose appliquée de 30 mm et une buse de 27,5 mm de diamètre, l'utilisation d'un tube de diamètre 140 mm au lieu de 110 mm entraîne une réduction de la consommation de fuel de 8 L/ha, soit une **économie d'énergie de 22%**. Avec une buse de 32,5 mm de diamètre, l'**économie d'énergie est de 37%**.

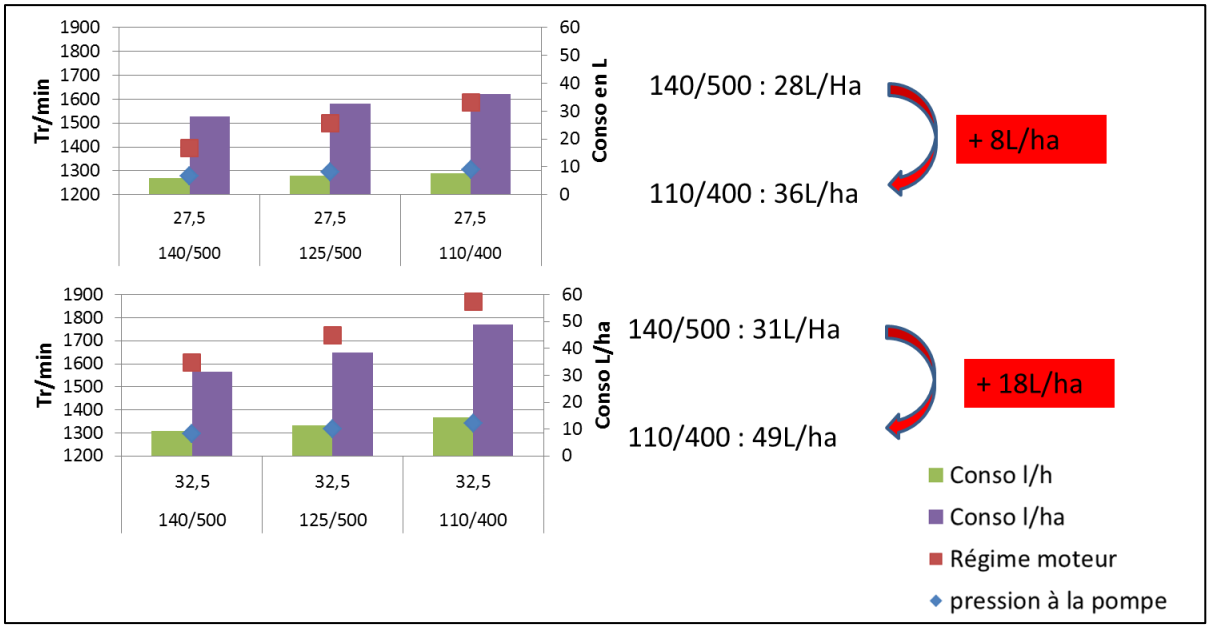


Figure 6. Impact du diamètre du tube polyéthylène sur la consommation en fuel d'un enrouleur thermique (Source : Chambre Régionale d'Agriculture d'Alsace ; Arvalis, 2017)

# 3. Quelles références expérimentales d'économies d'énergie ?

## 3.1. Parcelle alimentée par réseau collectif

On s'intéressera ici à la consommation énergétique des équipements d'irrigation **à la parcelle** uniquement.

### 3.1.1. Données mesurées : Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne – CACG (2012-2018)

#### Méthodologie

Les essais sont réalisés depuis 2012 à la station de La Mirandette, appartenant à la CACG, située sur la commune de Masseube (Gers) (Dejean et al, 2012 ; Dejean et al, 2013 ; Lopez et al, 2015 ; Dejean et Lopez, 2016 ; Lopez et Dejean, 2016 ; Lopez et Dejean, 2018 ; Lopez et Dejean, 2019). Les expérimentations portent sur l'analyse des performances agronomiques et énergétiques des différents systèmes d'irrigation : goutte-à-goutte enterré comparé à l'aspersion (canon enrouleur, couverture intégrale, pivot et rampe basse pression). Depuis 2018 les essais sont conduits en conduite agro-écologique avec semis direct sous résidus de cultures d'hiver. Les résultats de la présente étude n'incluent pas les travaux de 2019.

La culture est le maïs grain. Le sol, de type lessivé, présente une texture limoneuse en surface (L>50%) et argileuse en profondeur. Il se caractérise par la présence d'une couche indurée de graviers, de galets et d'argiles agglomérés par des dépôts de manganèse et de fer (*Grep*) témoignant de phénomènes d'oxydo-réduction induits par la présence d'hydromorphie temporaire. La réserve utile varie de 105 mm sur 75 cm de profondeur à 170 mm sur 110 cm de profondeur.

L'irrigation des traitements en aspersion est pilotée soit pour satisfaire 80, 85 ou 100 % des besoins en eau des cultures (80%ETM, 85%ETM ou 100%ETM, source Météofrance), soit à l'aide de tensiomètres. L'irrigation en GGE est réalisée à 70, 80, 85 ou 100% de l'ETM.

Pour le goutte-à-goutte, les gaines rigides (GR) ou souples (GS) sont enterrées à 45 cm de profondeur et distantes de 100 cm (GGE100) ou 150 cm (GGE150). Les gaines rigides fonctionnent sous une pression préconisée de 3,0 bars en raison du type de goutteurs utilisé (autorégulant) alors que les gaines souples enterrées du traitement GGE100-GS fonctionnent à 1,0 bar de pression seulement.

Ne disposant pas de compteurs électriques sur le réseau d'irrigation, l'énergie nette consommée (ENC) par le goutte-à-goutte a été estimée à partir des pressions d'eau (H) en entrée de parcelle et des volumes d'irrigation appliqués (relevés compteur) selon l'équation :

$$ENC = (Virr \times \rho eau \times g \times H)/3\,600\,000$$

Où
- ENC : Energie nette consommée à la parcelle (kWh)
- Virr : Volume d'irrigation appliqué à la parcelle ($m^3$ d'eau)
- ρeau : Masse volumique de l'eau (1000 $kg/m^3$)
- g : Accélération normale de la pesanteur terrestre (9,81 $m/s^2$ ou 9,81 N/kg)
- H : Pression hydraulique à l'entrée de la parcelle (en mètre de colonne d'eau)

Pour l'aspersion, les pressions de fonctionnement utilisées ont été celles habituellement fournies par le réseau de la CACG sur la base de référentiels constructeurs, à savoir 4 bars pour la couverture

intégrale, le pivot et la rampe, 6 bars pour l'enrouleur. Elles n'ont pas été vérifiées par des mesures sur le terrain. Les pressions de fonctionnement en GGE ont été mesurées par des sondes de pression relevées à l'entrée de chaque parcelle. Elles varient entre 1,0 et 1,8 bars pour le GGE-gaines souples et entre 2,5 et 3,4 bars pour le GGE-gaines rigides. Il s'agit là d'une des limites de cette étude qui compare des données de pression théoriques (aspersion) à des données mesurées (goutte-à-goutte). Il nous a cependant semblé intéressant de les présenter, tout en gardant à l'esprit qu'il s'agit, pour l'aspersion, de l'énergie consommée avec une pression du réseau adaptée à la demande du système d'application.

### Résultats

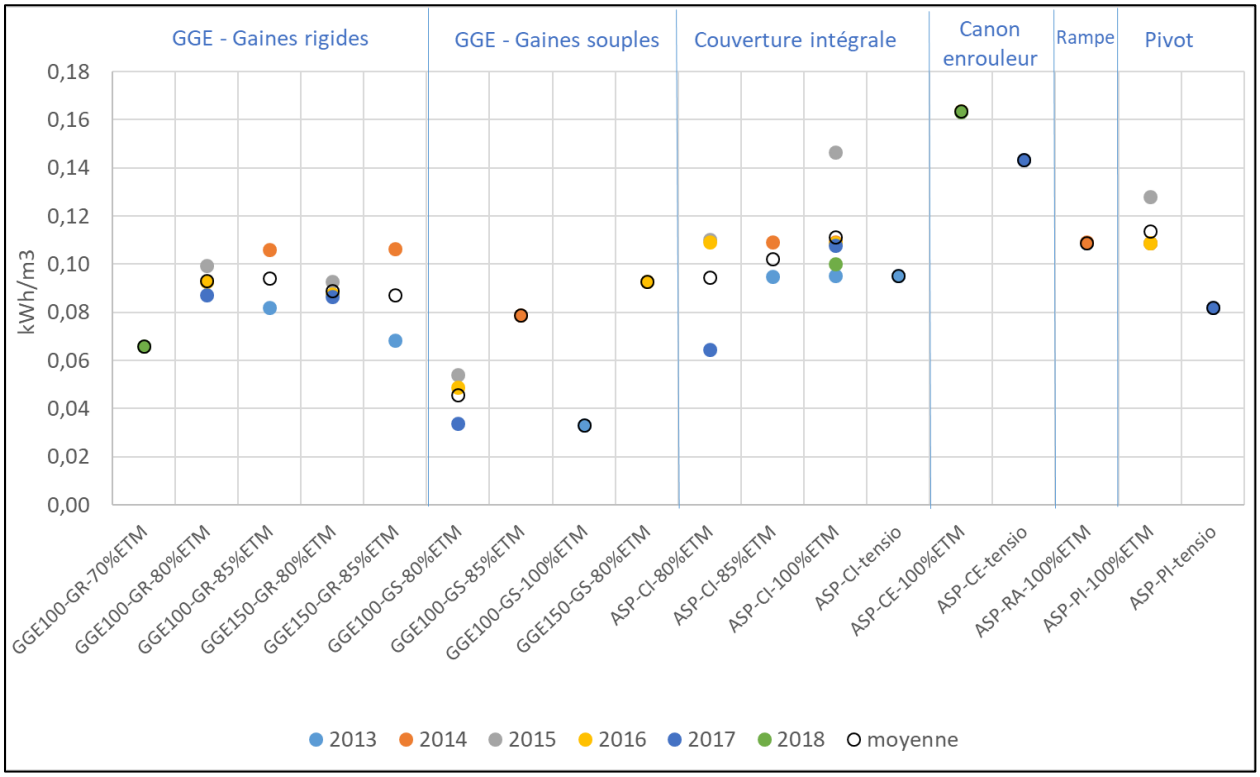


Figure 7. Consommation énergétique des différents systèmes d'irrigation à la station de La Mirandette (Gers)

Les consommations énergétiques (kWh/m$^3$) sont classées par système d'irrigation : GGE gaines rigides (GR), GGE gaines souples (GS), couverture intégrale, canon enrouleur, rampe, pivot (figure 7). Les consommations s'échelonnent entre 0.034 kWh/m$^3$ pour GGE100-GS en 2017 et 0.163 kWh/m$^3$ pour le canon enrouleur en 2018. On note, pour chaque système, une variabilité interannuelle. Cependant, l'ANOVA et le test de comparaison des moyennes permettent de regrouper les systèmes non-statistiquement différents au seuil de 5% en 3 catégories (figure 8, tableau 8) à consommation énergétique croissante au m$^3$ d'eau appliqué :

- GGE-gaines souples, fonctionnant à une pression plus faible, avec une consommation moyenne de 0.057 kWh/m$^3$
- GGE-gaines rigides, couverture intégrale, pivot, rampe, avec une consommation moyenne de 0.102 kWh/m$^3$
- Canon enrouleur, nécessitant une pression de fonctionnement plus élevée, avec une consommation moyenne de 0.154 kWh/m$^3$.

**En comparaison avec le canon enrouleur, les économies d'énergie réalisées avec la rampe, le pivot, la couverture intégrale ou le GGE-gaines rigides sont de 29% à 43% avec une moyenne de 34% ; les économies réalisées avec le GGE-gaines souples s'élèvent à 63%.**

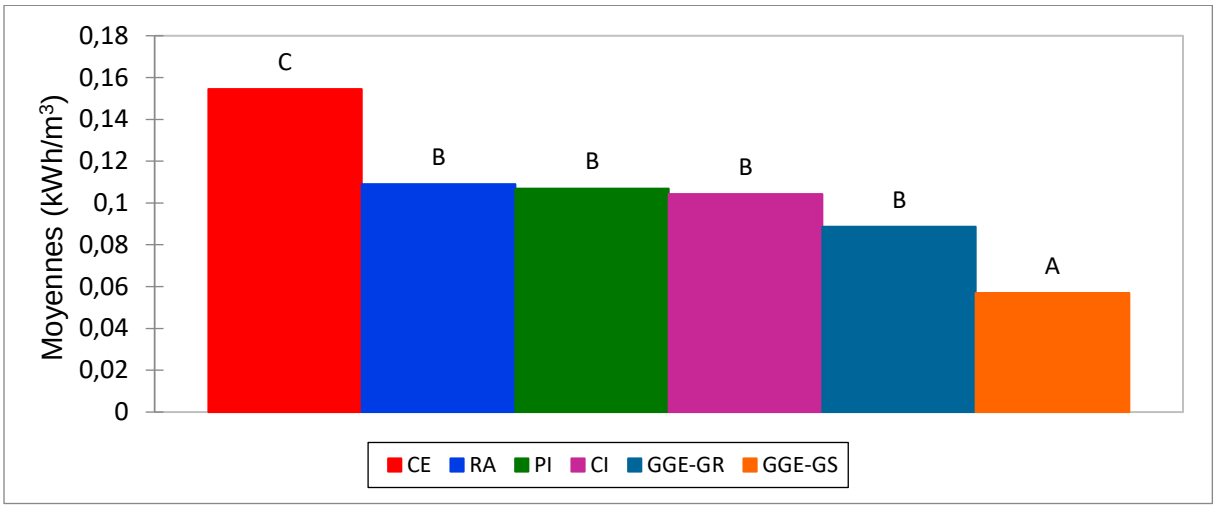


Figure 8. Consommation énergétique moyenne (kWh/m$^3$) de chaque système. Test de comparaison des moyennes Tukey HSD (5%). Canon enrouleur (CE), rampe (RA), pivot (PI), couverture intégrale (CI), GGE gaines rigides (GGE-GR) et GGE gaine souple (GGE-GS).

Tableau 8. Consommation énergétique moyenne (kWh/m$^3$) de chaque système et économie d'énergie réalisée. Canon enrouleur (CE), rampe (RA), pivot (PI), couverture intégrale (CI), GGE gaines rigides (GGE-GR) et GGE gaine souple (GGE-GS).

| Système d'irrigation | Consommation (kWh/m$^3$) | Consommation moyenne (kWh/m$^3$) | **Economie d'énergie par rapport au CE** | **Economie d'énergie moyenne par rapport au CE** |
|---|---|---|---|---|
| GGE-GS | 0.057 | 0.057 | **63%** | **63%** |
| GGE-GR | 0.089 | 0.102 | **43%** | **34%** |
| CI | 0.104 | | **32%** | |
| PI | 0.107 | | **31%** | |
| RA | 0.109 | | **29%** | |
| CE | 0.154 | 0.154 | -- | -- |

### 3.1.2. Données mesurées : CEMAGREF (2009)

#### Méthodologie

Le CEMAGREF a réalisé en 2009 des mesures de consommation énergétique de systèmes d'irrigation individuels représentatifs des situations rencontrées en France (Huet et al, 2011 ; Granier et Deumier, 2013). Les objectifs de l'étude étaient de (1) acquérir de nouvelles références de consommations énergétiques, (2) mettre en évidence les points faibles des systèmes d'irrigation et suggérer des voies d'amélioration, (3) participer à la mise en place de méthodologies robustes et simples de diagnostic énergétique permettant d'évaluer le potentiel d'économies d'énergie.

Les 17 systèmes choisis se situent sur des exploitations dans l'Ariège, l'Ain et le Bas-Rhin. Il s'agit de systèmes d'aspersion uniquement : enrouleurs, pivots et rampes, avec source d'énergie électrique ou thermique. Dans l'Ariège, l'irrigation est destinée à la production de semences (maïs, tournesol, colza). Dans l'Ain, elle concerne le maïs, le tabac. Dans le Bas-Rhin les surfaces irriguées sont cultivées en maïs ; l'irrigation se fait en 3-4 tours d'eau seulement, dans un objectif de sécurisation de la récolte.

L'analyse des installations consiste en un suivi des consommations énergétiques du système d'irrigation dans sa globalité, depuis l'entrée de la station de pompage jusqu'à la sortie de la buse, afin de caractériser précisément le fonctionnement de chaque composante. Les mesures sur plusieurs heures du couple débit-pression sont réalisées en différents points, d'où l'on déduit le niveau d'énergie hydraulique en (exemple de l'enrouleur) :

- 1. Entrée de la station de pompage,
- 2. Sortie de la station de pompage,
- 3. Entrée de l'enrouleur ou du pivot (ou rampe),
- 4. Sortie de la turbine,
- 5. Sortie du canon (dans le cas d'un enrouleur).

L'élévation du niveau d'énergie entre les points 1 et 2 rend compte du rendement de la station de pompage. Les pertes d'énergie entre les points 2 et 3 révèlent la consommation en énergie potentielle ainsi que les pertes de charge dans le réseau d'amenée (en amont et à l'intérieur de la parcelle). Les pertes d'énergie entre les points 3 et 4 représentent l'énergie mécanique dépensée par le système d'avancement de l'enrouleur (turbine, pneuride ou moteur auxiliaire) pour tracter le tube polyéthylène. Enfin, les pertes entre les points 4 et 5 sont celles dues aux pertes de charge dans le tube polyéthylène.

*Remarque. Dans le compte-rendu de cette étude CEMAGREF, les auteurs soulignent une limite de l'analyse. Celle-ci est en effet réalisée avec des mesures faites à un moment donné. Même si l'on se donne les moyens d'une extrapolation judicieuse avec des méthodes de simulations pertinentes et validées, on ne saura trop insister sur le fait que le suivi sur l'ensemble d'une campagne est le seul moyen d'appréhender une réalité souvent complexe.*

Cette partie de la présente étude se focalise sur les économies d'énergie réalisables à l'échelle de la parcelle. Par conséquent, seuls les niveaux d'énergie en entrée d'enrouleur (ou du pivot ou de la rampe) seront pris en compte. Ils seront considérés comme équivalents à ceux en entrée de parcelle, autrement dit on considère la consommation d'énergie pour la distribution à la parcelle comme négligeable

### Résultats

Les consommations énergétiques en kWh/m$^3$ des divers systèmes sont représentées sur la figure 9. Elles varient de 0,202 à 0,253 (moyenne 0,230 kWh/m$^3$) pour les enrouleurs, 0,111 à 0,167 (moyenne 0,126 kWh/m$^3$) pour les pivots et 0,125 à 0,167 (moyenne 0,140 kWh/m$^3$) pour les rampes. Le test de comparaison de moyennes (figure 10) permet de distinguer deux groupes significativement différents au seuil de 5% : les enrouleurs plus énergivores et les pivots/rampes moins consommateurs.

**En comparaison avec le canon enrouleur, les économies d'énergie réalisées avec la rampe et le pivot, s'élèvent de 39 % à 45 % avec une moyenne de 42 %** (tableau 9)**.** Cette valeur, bien que légèrement supérieure, reste du même ordre de grandeur que celle trouvée par l'étude CEMAGREF décrite ci-dessus (34 % en moyenne pour l'ensemble rampe, pivot, couverture intégrale, goutte-à-goutte enterré gaines rigides).

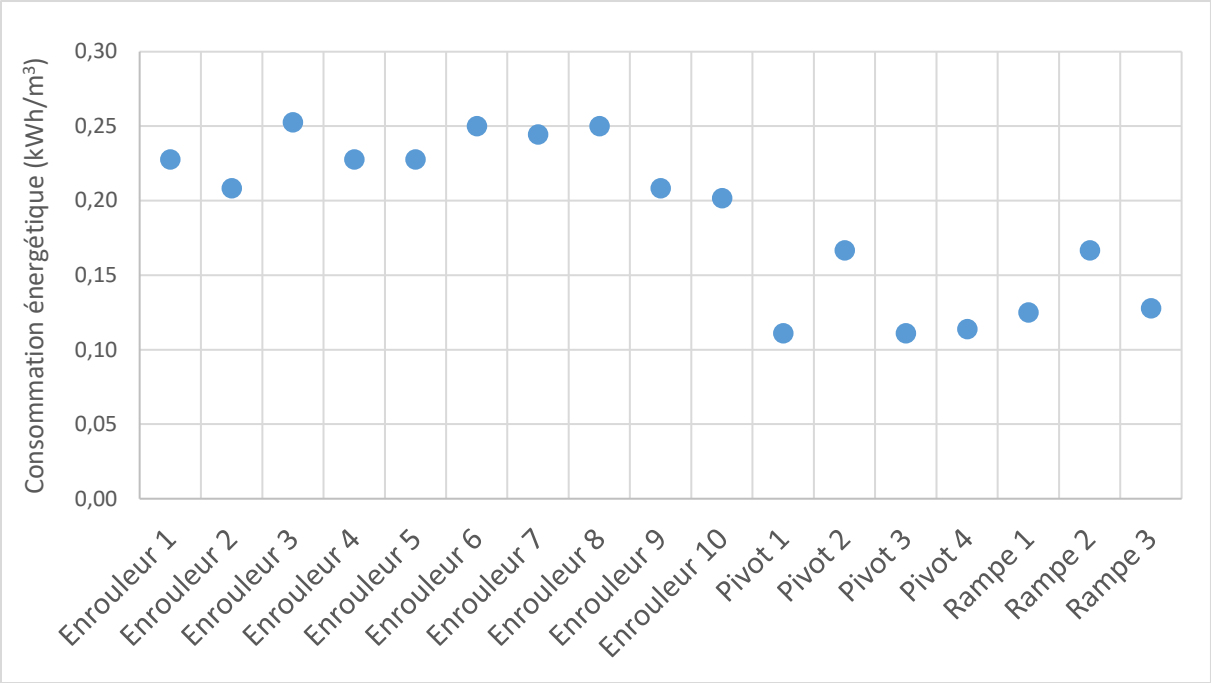


Figure 9. Consommation énergétique à la parcelle des différents systèmes d'irrigation (Huet et al, 2009)

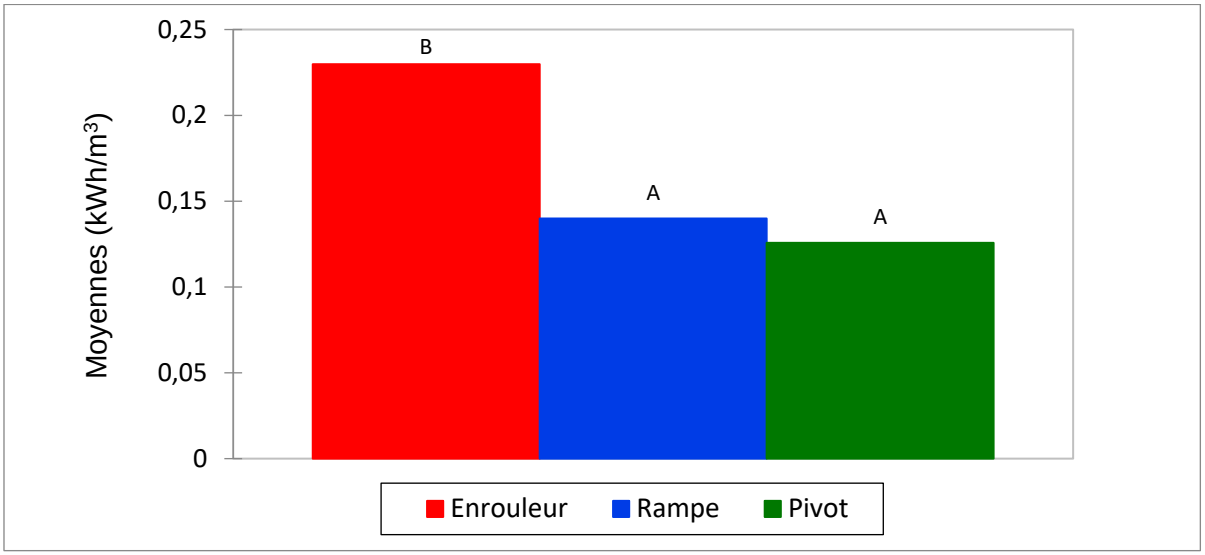


Figure 10. Consommation énergétique moyenne à la parcelle (kWh/m³) de chaque système. Test de comparaison des moyennes Tukey HSD (5%).

Tableau 9. Consommation énergétique moyenne à la parcelle (kWh/m³) de chaque système et économie d'énergie réalisée.

| Système d'irrigation | Consommation (kWh/m³) | **Economie d'énergie moyenne à la parcelle par rapport à l'enrouleur** | **Economie d'énergie moyenne à la parcelle par rapport à l'enrouleur** |
|---|---|---|---|
| Pivot | 0.126 | **45 %** | **42%** |
| Rampe | 0.140 | **39 %** | |
| Enrouleur | 0.230 | -- | -- |

### 3.1.3. Données calculées : Fonds Français pour l'Environnement Mondial – FFEM (2000)

#### Méthodologie

Les travaux de Goossens (2000) évaluent précisément la demande en énergie hydraulique des différents systèmes d'irrigation au niveau de la parcelle. Il ne s'agit pas de mesures, ni de données « terrain » comme celles présentées précédemment, mais d'une analyse détaillée permettant d'estimer la demande d'énergie utile, basée sur des calculs d'énergie et de puissance hydrauliques.

Cette étude théorique porte sur six systèmes d'irrigation différents :

- Aspersion
  - Couverture intégrale d'asperseurs basse pression (pression de service 1,5 bar)
  - Couverture intégrale d'asperseurs moyenne pression (3 bar)
  - Enrouleur avec canon haute pression (6 bar)
  - Rampes sur pivot basse pression (1 bar)
- Irrigation Localisée
  - Irrigation localisée utilisant des goutteurs (1 bar)
  - Irrigation localisée utilisant des mini-diffuseurs (0,5 bar)

L'eau est considérée disponible à l'entrée du champ (cas d'une borne de réseau collectif). Le calcul de la demande en énergie de chaque étape est réalisé : distribution à la parcelle, application (distributeur final), élévation (pour pivot, couverture intégrale, enrouleur), filtration (pour l'irrigation localisée), mise en mouvement du pivot, fonctionnement de la turbine de l'enrouleur.

La culture de référence est une culture d'Afrique du Nord, avec un besoin en eau d'irrigation de 615 mm sur une saison culturale. La surface à irriguer est de 5 hectares. Le sol choisi pour cette comparaison est un sol de type argilo limoneux dont la capacité de stockage est de 0,15 mm par mm de sol. La profondeur d'enracinement de la culture est de 30 cm, d'où une capacité de stockage de 45 mm. Les apports d'eau sont réalisés, en l'absence de pluies, en 14 fois pour les systèmes d'aspersion ou 88 fois en irrigation localisée. Pour plus de détails sur la méthode et les hypothèses de calcul, se référer au rapport de Goossens (2000).

#### Résultats

La consommation énergétique totale de l'enrouleur (0,2860 kWh/m$^3$) est environ 6 fois plus importante que celle d'un système d'irrigation localisée (0,0418 et 0,0525 kWh/m$^3$ pour la mini-aspersion et le goutte-à-goutte respectivement) (figure 11). Le pivot et les deux systèmes de couverture intégrale ont des consommations intermédiaires. La principale différence entre les systèmes est due à la part de l'énergie nécessaire à l'application.

**Les économies d'énergie réalisées** (tableau 10) **en comparaison du canon enrouleur varient entre 85% (mini-diffuseurs) et 50% (couverture intégrale haute pression). Par rapport à la couverture intégrale basse pression, le goutte-à-goutte permet 32% et les mini-diffuseurs 46% d'économies.**

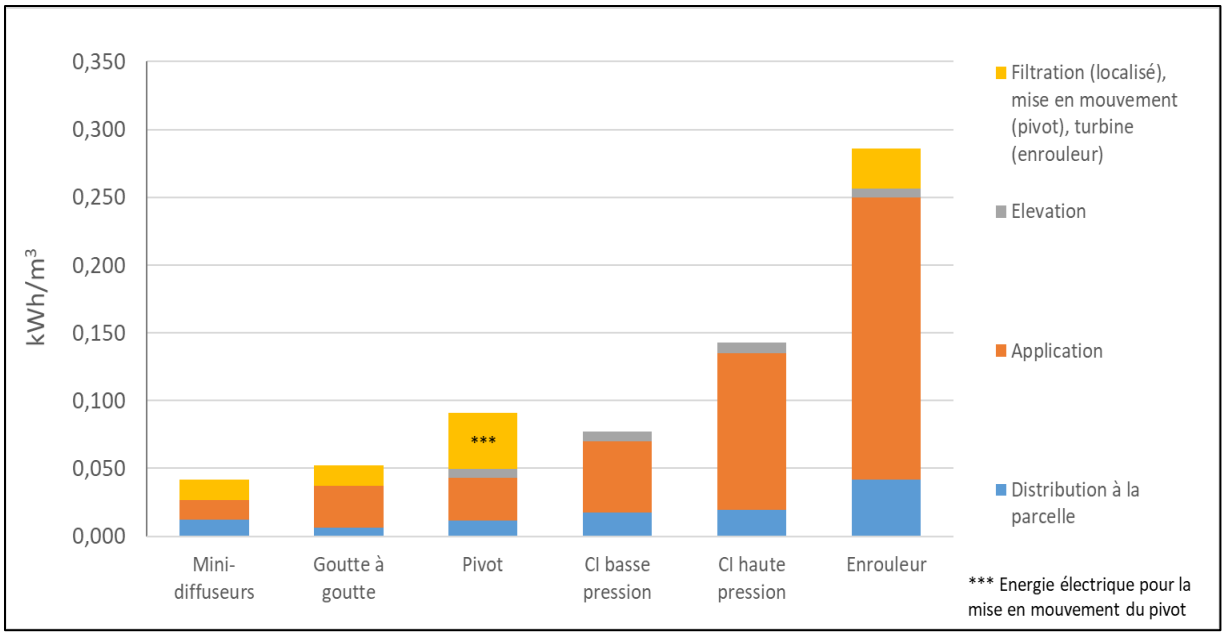


Figure 11. Répartition de la consommation énergétique (kWh/m³) des différents systèmes d'irrigation à la parcelle pour une saison (CI : couverture intégrale)

Tableau 10. Consommation énergétique moyenne à la parcelle (kWh/m³) de chaque système et économie d'énergie réalisée par rapport à l'enrouleur (CI : couverture intégrale)

| Système d'irrigation | Consommation (kWh/m³) | **Economie d'énergie par rapport à l'enrouleur** | **Economie d'énergie par rapport à la CI haute pression** | **Economie d'énergie par rapport au pivot** | **Economie d'énergie par rapport à la CI basse pression** |
|---|---|---|---|---|---|
| Mini-diffuseurs | 0.0418 | **85 %** | **71 %** | **54 %** | **46 %** |
| Goutte-à-goutte | 0.0525 | **82 %** | **63 %** | **42 %** | **32 %** |
| CI basse pression | 0.0774 | **73 %** | **46 %** | **15 %** | **--** |
| Pivot | 0.0907 | **68 %** | **36 %** | **--** | **--** |
| CI haute pression | 0.1428 | **50 %** | **--** | **--** | **--** |
| Enrouleur | 0.2860 | **--** | **--** | **--** | **--** |

### 3.1.4. Synthèse des données relatives aux consommations énergétiques des systèmes à la parcelle

Tableau 11. Synthèse des consommations énergétiques observées (kWh/m³) de systèmes d'irrigation alimentés par réseau collectif

| **Economie d'énergie (%)** | Canon enrouleur | Rampe/ pivot | Couverture intégrale | Goutte-à-goutte basse pression |
|---|---|---|---|---|
| Canon enrouleur | -- | 29-31 [1]<br>42 [2] | 32 [1] | 43-63 [1] |
| Rampe/pivot | -- | -- | | 44 [1] |
| Couverture intégrale | -- | -- | -- | 44 [1] |

[1] CACG 2012 à 2018
[2] CEMAGREF 2009

Le tableau 11 présente la synthèse des économies d'eau obtenues sur le terrain sur des installations alimentées par réseau collectif, donc d'après mesures de consommations énergétiques à la parcelle. N'ont pas été intégrées les données théoriques calculées. D'après ces valeurs ont été estimées les fourchettes et moyennes d'économies d'énergie potentiellement réalisables (tableau 12).

Tableau 12. Economies potentielles d'énergie lors d'un changement de système d'irrigation alimenté par réseau collectif. Moyennes (min - max)

| **Economie d'énergie (%)** | Canon enrouleur | Rampe/ pivot | Couverture intégrale | Goutte-à-goutte basse pression |
|---|---|---|---|---|
| Canon enrouleur | -- | **30 %** (25 - 40) | **35 %** (30 - 40) | **50 %** (40 - 60) |
| Rampe/pivot | -- | -- | | **40 %** |
| Couverture intégrale | -- | -- | -- | **40 %** |

[1] CACG 2012 à 2018
[2] CEMAGREF 2009

## 3.2. Parcelle alimentée par pompage individuel

On décrira dans cette partie les consommations énergétiques globales, incluant les consommations en amont (pompage, conduites d'amenée) et à l'intérieur de la parcelle (conduites et équipement à la parcelle). Il est important de souligner dès à présent qu'une diminution de la consommation énergétique du système à la parcelle doit être accompagnée d'un changement de pompe. Si on conserve la même pompe en ajoutant un réducteur de pression, on ne réalisera qu'une faible économie d'énergie.

### 3.2.1. CEMAGREF (2009)

Ce paragraphe reprend les données acquises au cours de l'étude CEMAGREF 2009 (Huet et al, 2011 ; Granier et Deumier, 2013) dont la méthodologie est décrite dans la section 3.1.2. Données CEMAGREF 2009, en considérant non plus seulement les consommations énergétiques des équipements à l'intérieur de la parcelle mais également les consommations en amont de la parcelle, depuis la station de pompage, le réseau d'amenée jusqu'à la sortie de la buse.

*Résultats : Consommation en énergie primaire*

Les 17 systèmes étudiés sont des enrouleurs, pivots ou rampes, avec source d'énergie électrique ou thermique. L'analyse de l'énergie primaire consommée permet de comparer les systèmes ayant des sources d'énergie finale différentes (électricité ou gasoil).

La consommation globale en énergie primaire du pivot le plus efficient (1,13 kWh/m$^3$) est plus faible que celle de l'enrouleur le plus efficient (1,41 kWh/m$^3$) (figure 12), soit une économie d'énergie primaire de 20%. Cependant, le pivot le moins efficient consomme autant d'énergie primaire que l'enrouleur le moins efficient. On ne peut pas conclure que le système de pivot ou rampe consomme significativement moins d'énergie primaire globale que l'enrouleur (figure 13).

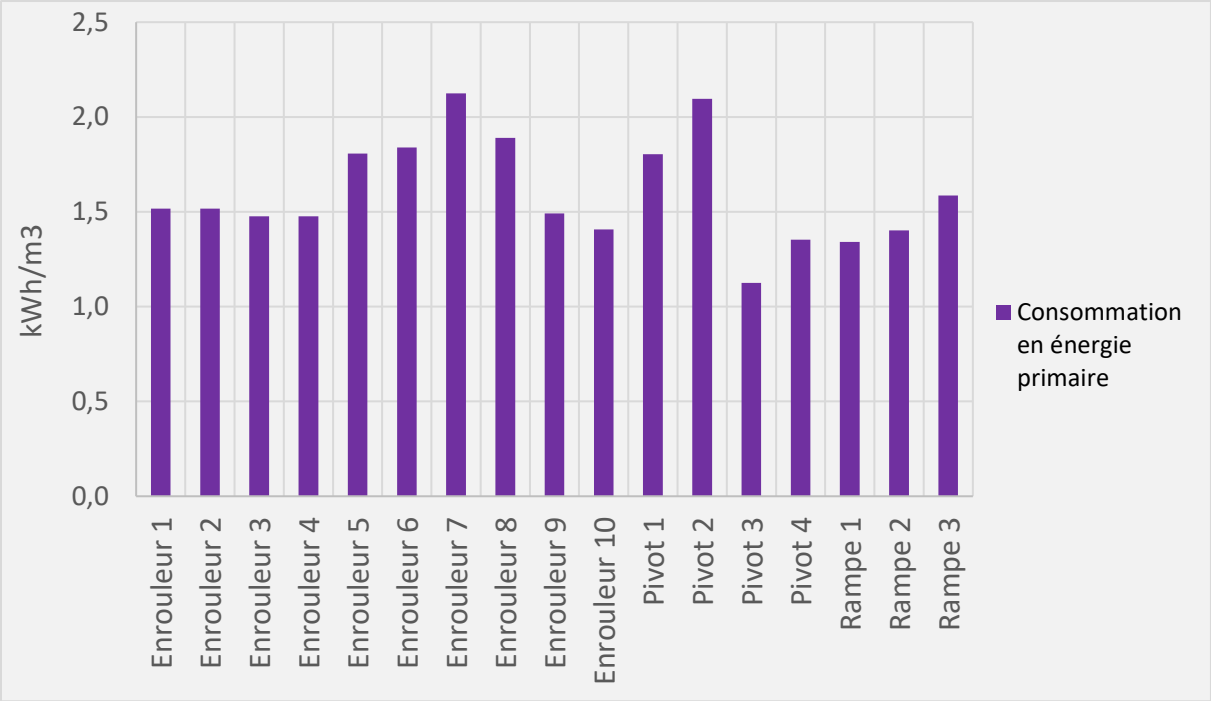


Figure 12. Consommation en énergie primaire des différents systèmes d'irrigation depuis la station de pompage (Huet et al, 2009)

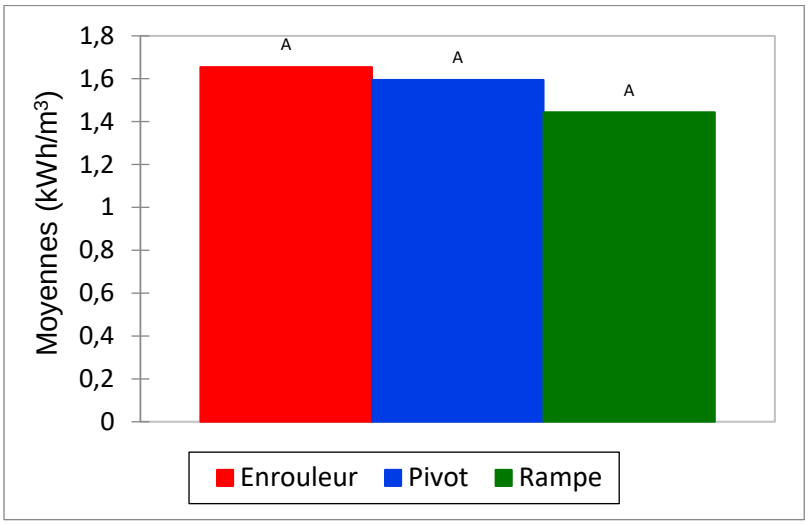


Figure 13. Consommation moyenne en énergie primaire (kWh/m$^3$) de chaque système. Test de comparaison des moyennes Tukey HSD (5%).

*Résultats : Consommation en énergie finale (électrique ou thermique)*

La figure 14 présente la répartition de l'énergie finale consommée par les 17 systèmes étudiés. Les consommations totales moyennes sont de 0,46 kWh/m$^3$ pour les enrouleurs électriques, 1,47 kWh/m$^3$ pour les enrouleurs thermiques, 0,46 kWh/m$^3$ pour les pivots et rampes électriques et 1,39 kWh/m$^3$ pour les pivots thermiques.

Les consommations par la station de pompage sont nettement plus importantes pour les installations thermiques (enrouleurs 5 à 8 et pivot 1), en raison des déperditions d'énergie liées à des rendements énergétiques particulièrement faibles pour les groupes motopompes thermiques, 16 à 21 %, contre 54

à 61% pour les moteurs électriques pour lesquels on ne prend pas en compte le rendement de fabrication de l'électricité (cf. § 1.1.2.1.).

L'énergie dissipée dans le réseau correspond aux pertes de charge qui sont très variables d'une situation à l'autre. Dans les cas étudiés, ces pertes semblent plus importantes dans les installations à pivot, néanmoins elles ne sont pas liées au système d'irrigation lui-même mais reflètent la diversité des situations topographiques.

L'énergie disponible à la parcelle, utilisée par le matériel d'application, a été discutée au paragraphe 1.1.2.4. Elle est en moyenne de 0.12 kWh/m$^3$ pour le pivot ou la rampe et 0.23 kWh/m$^3$ pour l'enrouleur.

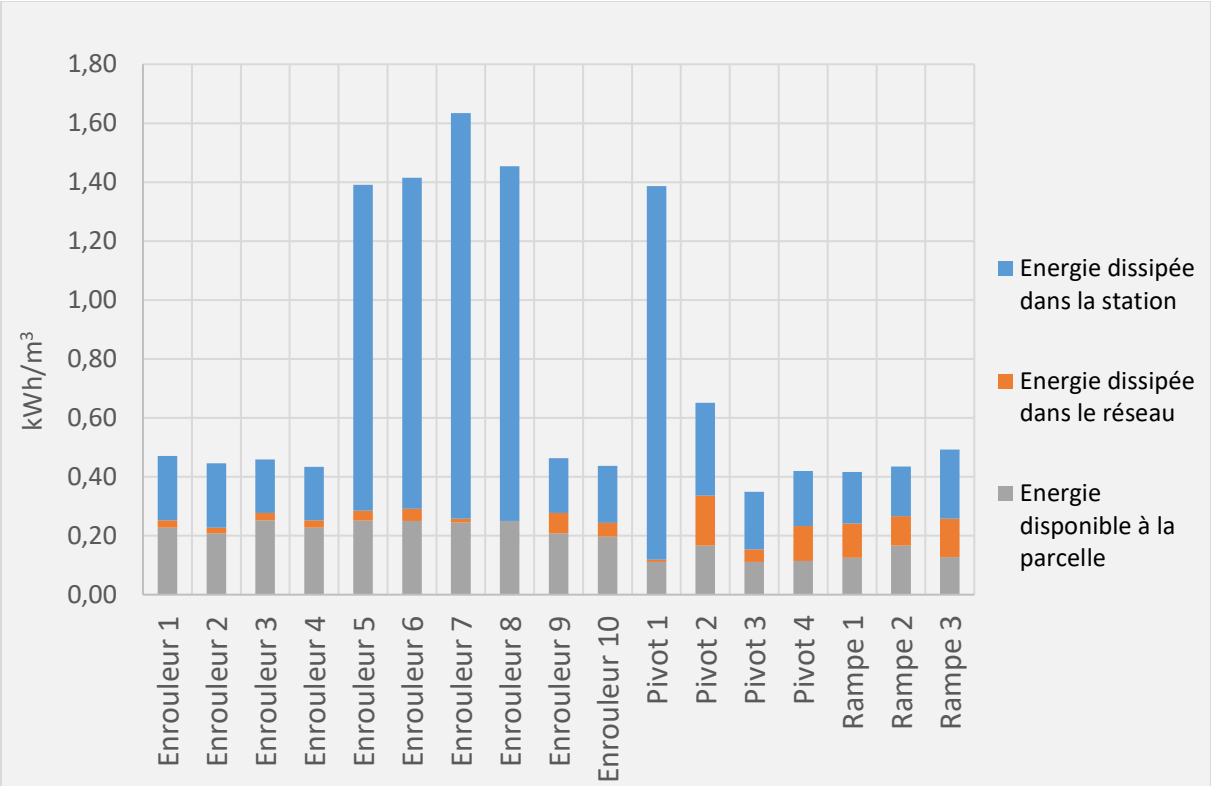


Figure 14. Consommation en énergie finale des différents systèmes d'irrigation. Répartition de l'énergie entre la station de pompage, le réseau d'amenée et la parcelle (Huet et al, 2009)

A source d'énergie équivalente, les résultats ne permettent pas de mettre en évidence une différence significative de consommation en énergie finale entre les enrouleurs, les pivots et les rampes (figure 15 pour les systèmes électriques). Même si la baisse de consommation à la parcelle des pivots et rampes par rapport à celle de l'enrouleur est réelle (figure 14 et § 3.1.2. Données CEMAGREF 2009), elle est masquée lorsque l'on considère l'installation dans son ensemble puisque la part du transport de l'eau pour les rampes et pivots représente plus d'énergie que celle des enrouleurs. **On n'observe donc pas nécessairement d'économie d'énergie significative entre les systèmes de même source d'énergie.**

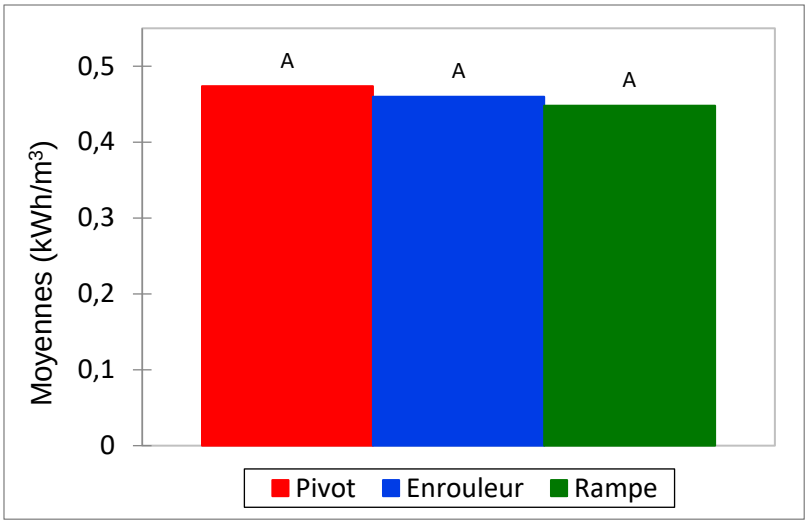


Figure 15. Consommation moyenne en énergie finale (kWh/m³) des systèmes électriques. Test de comparaison des moyennes Tukey HSD (5%).

### 3.2.2. Volet irrigation du projet EDEN (2012-2016)

*Méthodologie*

Le volet irrigation du projet EDEN (Du capteur à l'indicateur : les Entrepôts de Données spatiales au service de l'évaluation des performances ENergétiques des entreprises agricoles) (Donnat et al, 2017) est né d'une attente de la profession de disposer d'outils utilisables au niveau des exploitations, qui permettraient de mieux connaître et analyser les performances énergétiques des systèmes d'irrigation. Les partenaires étaient ARVALIS-Institut du végétal, les Chambres d'Agriculture de Haute-Garonne et du Lot-et-Garonne, IRSTEA et la CACG, avec le soutien financier du Ministère de l'Agriculture, de l'Agence de l'Eau Adour-Garonne et du Conseil Régional Midi-Pyrénées. L'objectif était de mettre au point des méthodes de diagnostic de la consommation et des efficiences de l'eau et de l'énergie d'installations d'irrigation individuelles et collectives (Arvalis, 2017). De 2012 à 2016, les travaux ont porté sur les consommations énergétiques d'installations situées en Haute-Garonne et dans le Lot-et-Garonne afin de :

- Collecter à une échelle temporelle fine les données utiles pour évaluer des indicateurs énergétiques au niveau de l'exploitation,
- Concevoir et mettre en œuvre des « entrepôts de données » pour intégrer ces données, les gérer et les analyser,
- Promouvoir des solutions techniques pour améliorer la maîtrise des consommations énergétiques sur les exploitations.

De nombreuses installations individuelles **non-instrumentées** ont été suivies ponctuellement par relevés de compteurs d'eau et d'électricité avant et après une position d'irrigation afin d'obtenir les valeurs moyennes de consommation énergétique globale (kWh/m³ pompé) en fonction du type de matériel. Ces valeurs mesurées étaient destinées à être comparées à des valeurs théoriques calculées en fonction des caractéristiques hydrauliques de l'installation. Seront présentées ci-dessous uniquement les valeurs mesurées.

Trois installations individuelles (enrouleur, pivot, couverture intégrale) ont été **instrumentées** pour un suivi en continu à l'aide de capteurs de pression, dans le but d'analyser la répartition de la consommation énergétique et d'identifier les postes les plus énergivores de l'installation.

*Résultats*

## Consommation énergétique globale (parcelles non-instrumentées)

Tableau 13. Moyennes des consommations énergétiques (kWh/m$^3$ compteur) des installations d'irrigation étudiées au cours du projet EDEN de 2012 à 2015 (N : nombre d'installations)

| | **Haute-Garonne** | | | | **Lot et Garonne** | | | | | | | | **Moyenne** | **Economie d'énergie par rapport à l'enrouleur électrique** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **2012 - 2014** | | **2015** | | **2012** | | **2013** | | **2014** | | **2013 - 2014** | | **2012 - 2015** | |
| | N | kWh / m$^3$ | N | kWh /m$^3$ | N | kWh / m$^3$ | N | kWh / m$^3$ | N | kWh /m$^3$ | N | kWh /m$^3$ | **kWh/m$^3$** | |
| Enrouleur électrique | 16 | 0,68 | 4 | 0,51 | 4 | 0,44 | 5 | 0,42 | 6 | 0,46 | | | **0,54** | |
| Enrouleur thermique | | | | | | | | | | | 1 | 1,62 | **1,62** | |
| Pivot | 12 | 0,42 | 6 | 0,44 | | | | | | | | | **0,43** | **21%** |
| Couverture intégrale | 14 | 0,41 | | | | | | | | | | | **0,41** | **25%** |

Le tableau 13 présente les consommations mesurées à partir des relevés de compteurs d'eau et électricité au cours de 4 années d'étude. L'enrouleur électrique consomme en moyenne 0,54 kWh/m$^3$, l'enrouleur thermique 1,62, le pivot 0,43 et la couverture intégrale 0,41. Il faut noter que les installations étudiées ne comportent pas ou peu de dénivelé ; les consommations seraient à revoir à la hausse en cas de fort dénivelé positif. **Sur les installations étudiées, l'économie d'énergie électrique réalisée en comparaison de l'enrouleur se situe autour de 20-25 % pour le pivot et la couverture intégrale.**

## Répartition de la consommation énergétique (parcelles instrumentées)

Sur les 3 installations étudiées (figure 16), le rendement du groupe motopompe varie de 40 à 50%, ce qui signifie que 60 à 50% de l'énergie finale utilisée est perdue à ce niveau.

Dans le cas de l'enrouleur, 18% de l'énergie finale est dissipée dans le réseau et 14% dans l'équipement sur la parcelle (turbine, tube de polyéthylène). Il ne subsiste donc au canon que 18% de l'énergie finale pour l'application de l'eau. Pour le pivot et la couverture intégrale, les pertes dans le réseau sont moins importantes (< 10%). Les pertes dans les équipements à la parcelle sont plus fortes en couverture intégrale qu'avec le pivot (21% et 4% respectivement). L'énergie disponible pour le canon d'extrémité du pivot représente 38% de l'énergie finale consommée, contre 10% pour le sprinkler en fin de ligne de la couverture intégrale.

La part d'énergie consommée entre la sortie de la pompe et la buse du canon est près de trois fois supérieure pour l'enrouleur en comparaison du pivot, en raison de la longueur du réseau d'amenée (423 m) et de la consommation de la turbine. Le reste de l'énergie se répartit entre la vanne, le filtre (pivot), le dénivelé (ou montée du pivot) et le tube.

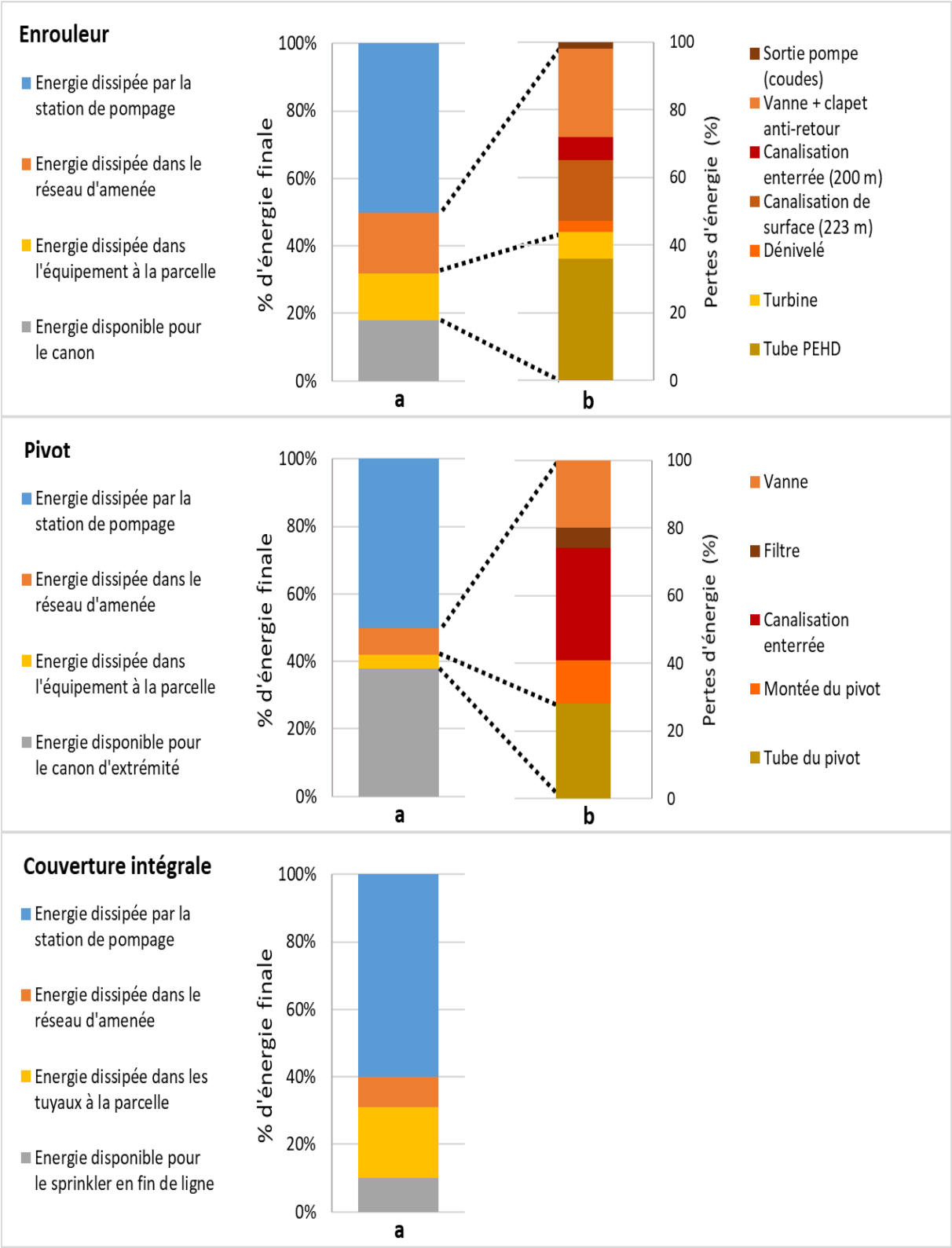


Figure 16. Etude de trois installations : enrouleur, pivot, couverture intégrale. (a) Répartition **mesurée** de l'énergie finale consommée (%) entre la pompe, le réseau d'amenée et la parcelle. (b) Répartition **mesurée** détaillée de l'énergie entre la sortie de la pompe et la buse du canon (%)

### 3.2.3. Arvalis (2017)

L'objectif de ce travail était de finaliser l'approche énergétique du diagnostic réalisée au cours du projet EDEN décrit précédemment, en passant d'une version conceptuelle à un outil opérationnel (Devaud, 2017). La méthode de calcul des consommations énergétiques a été optimisée en recherchant les formules les plus performantes et adaptée à tous les types d'installations. Les calculs ont ensuite été automatisés et utilisés pour la mise en œuvre du diagnostic énergétique de plusieurs installations d'irrigation par aspersion chez des agriculteurs lors de la campagne d'irrigation 2017. Les consommations globales mesurées (kWh/m$^3$) ainsi que la répartition de l'énergie par modélisation seront utilisées dans la présente étude afin de comparer les consommations des diverses installations.

La consommation de l'enrouleur thermique est de 0,98 kWh/m3, celle des enrouleurs électriques varie entre 0,43 et 0,63 kWh/m$^3$, celle l'hippodrome est de 0,53 kWh/m$^3$ (tableau 14). Ici encore, les différences sont dues non seulement au système d'application lui-même (enrouleur ou hippodrome), mais également aux caractéristiques de l'installation en amont de la parcelle. Comme le met en évidence la figure 17, dans le cas de la rampe hippodrome, la majeure partie de l'énergie disponible en sortie de pompe est dissipée par pertes de charge dans les conduites d'amenée (de surface et enterrée) ; seule une faible partie est perdue dans le tube du pivot. Inversement, dans les installations à enrouleur, une part réduite de l'énergie (moins de 18%) est perdue dans le réseau d'amenée, la plus grande perte se situant dans le tube de l'enrouleur (72 à 86%) et, dans une moindre mesure, dans le fonctionnement de la turbine (10% environ).

Tableau 14. Consommations énergétiques **mesurées** (kWh/m$^3$ compteur) des installations d'irrigation étudiées

| **Installation** | **1** | **2** | **3** | **4** |
|---|---|---|---|---|
| **Localisation** | **Ain** | **Gers** | **Bas-Rhin** | **Vienne** |
| **Pompe** | Electrique | Electrique | Thermique | Electrique |
| | Immergée | De surface | De surface | Pompe immergée + surpresseur en surface |
| **Matériel d'aspersion** | Rampe hippodrome | Mixte : Pivot +enrouleur | Enrouleur | Enrouleur |
| **Consommation (kWh/m$^3$ mesuré compteur)** | **0.53** | Campagne complète (Pivot +Enrouleur) **0.56** Enrouleur seul **0.63** Pivot seul **0.49** | **0.98** | **0.43** |

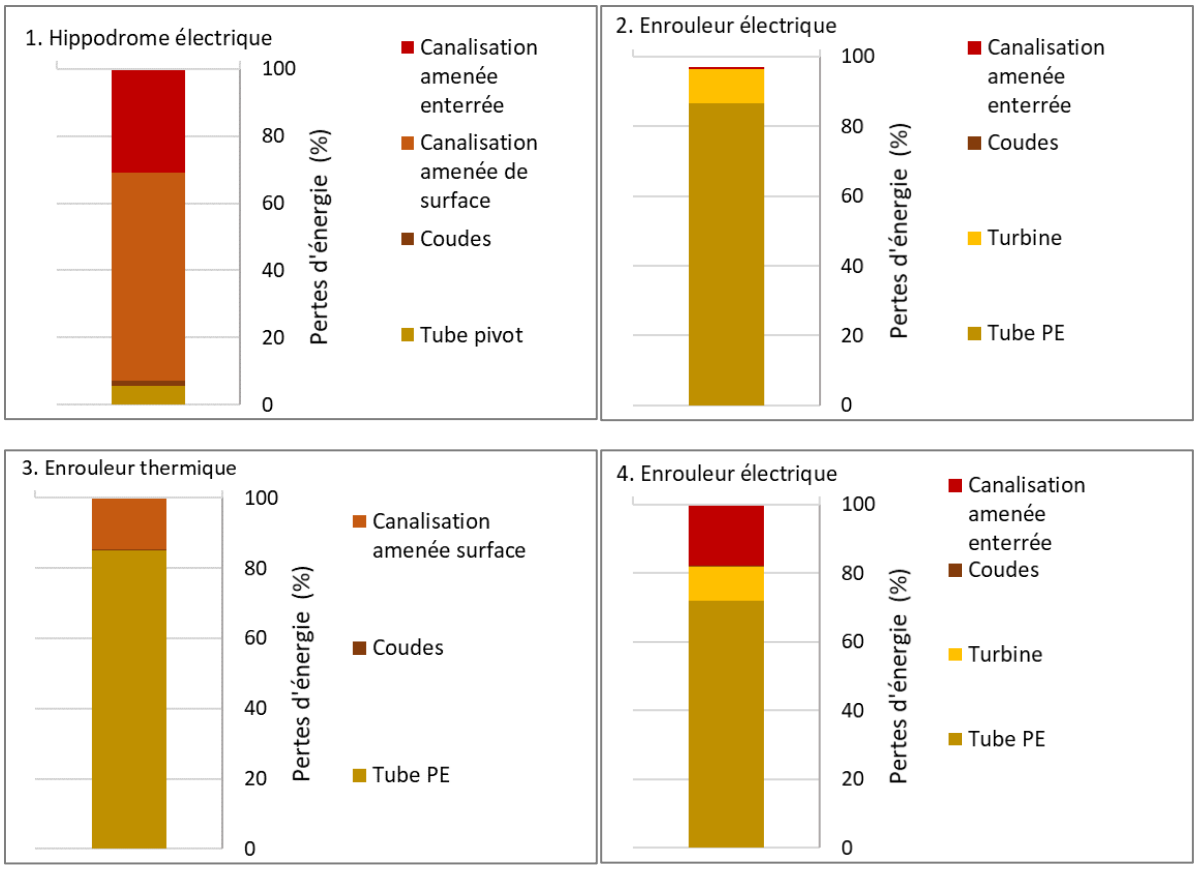


Figure 17. Répartition **modélisée** de l'énergie entre la sortie de la pompe et la buse sur les installations d'irrigation étudiées

### 3.2.4. GRCETA des sols forestiers d'Aquitaine (2007)

Le groupement de recherche sur les cultures et techniques agricoles des sols forestiers d'Aquitaine (GRCETA SFA) a réalisé en 2007 une étude portant sur les consommations énergétiques du poste irrigation des exploitations de Haute Landes (Heredia, 2007). Dans un contexte de sols sableux à faible réserve utile (12 à 50 mm, moyenne 30 mm), avec culture de maïs grain prédominante et diversification en cultures légumières, il s'agissait de réaliser le diagnostic énergétique des installations d'irrigation puis de proposer des voies d'amélioration des performances énergétiques et de réduction des consommations. Les pivots représentent 92% de la surface irriguée sur le territoire, les rampes et hippodromes 5%. Ces trois systèmes ont donc été privilégiés dans l'étude du GRCETA SFA. La source d'énergie pour les pompes et systèmes d'irrigation est l'électricité exclusivement.

Sur 19 installations étudiées (pivots/rampes/hippodromes), la consommation énergétique globale (pompage, réseau et application) varie entre 0,35 et 0,56 kWh/m$^3$ (figure 18), avec une moyenne de 0,43 kWh/m$^3$. D'après l'expertise du GRCETA SFA, la consommation optimale atteignable pour les pivots de la zone est de 0,3 kWh/m$^3$, sauf cas de contraintes de relevage particulières (forage à plus de 20m). 60% des exploitations enquêtées présentent une consommation de 0,4 à 0,5 kWh/m$^3$, d'où une **économie potentielle d'énergie de 25 à 40%.**

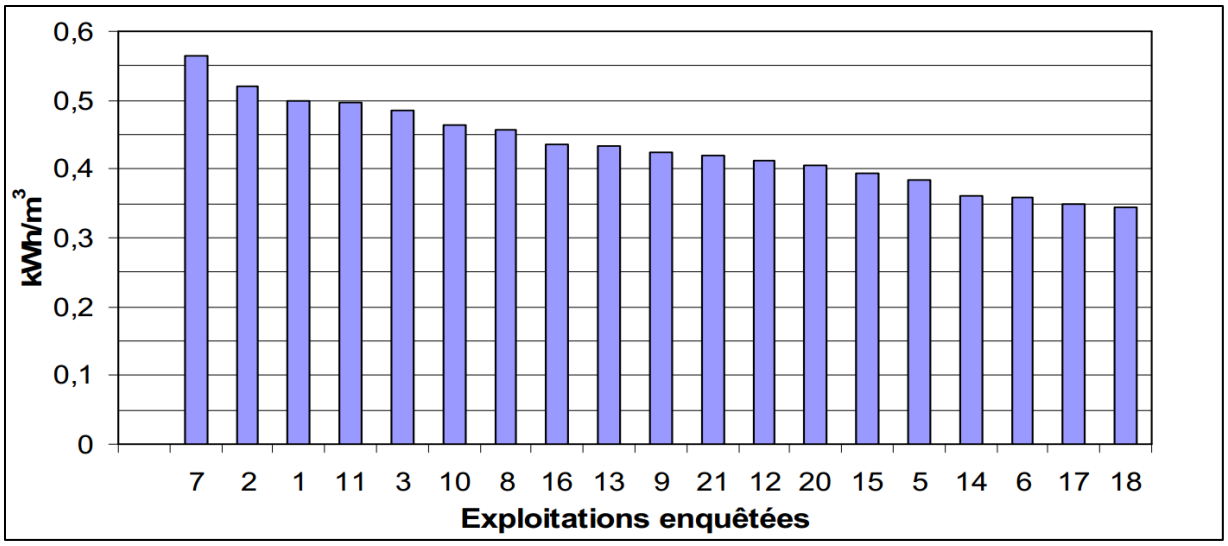

Figure 18. Consommation en énergie finale de 19 installations (pivots/ rampes/hippodromes).

### 3.2.5. Chambre d'agriculture des Landes (2012)

*Méthodologie*

L'objectif de l'essai était de suivre le pilotage de l'irrigation avec un système de goutte-à-goutte enterré sur maïs en comparaison avec un système conventionnel par pivot, afin de connaitre son efficacité et voir s'il permet de faire des économies d'eau. L'essai, sur deux parcelles voisines d'un même agriculteur, a débuté en 2012 et est encore en cours actuellement, avec suivi des consommations en eau au cours de chaque campagne. Les consommations énergétiques ont été suivies en 2012 uniquement (Chambre d'Agriculture des Landes, 2012).

Le sol est de type « sable du Marsan » avec une faible réserve utile (RFU de 45 mm). Les gaines de goutte-à-goutte sont enfouies à 33cm de profondeur et espacées de 1 m. Les goutteurs auto-régulants, de débit 0,6 L/h, sont espacés de 50 cm.

L'alimentation en eau des deux parcelles provient du réseau collectif de l'ASA de Saint-Cricq-Villeneuve à partir d'un pompage collectif dans la rivière Midou. Cependant, pour approcher l'économie d'énergie potentielle réalisée avec le goutte-à-goutte, la Chambre d'Agriculture des Landes a **simulé** le fonctionnement d'une pompe haute pression qui aurait pu faire fonctionner le pivot sur la parcelle et celui d'une pompe basse pression et de plus faible débit adaptée au goutte-à-goutte. Cette simulation reproduit donc le cas de parcelles alimentées avec une station de pompage individuelle. Il faut cependant souligner que, dans la réalité, cet irrigant est aujourd'hui toujours sur le réseau collectif de l'ASA. La borne qui alimente le goutte-à-goutte délivre une pression de 10 bars ! Deux régulateurs de pression sont donc nécessaires afin de parvenir à dissiper l'énergie et obtenir une pression de 2 bars à l'entrée de la parcelle goutte-à-goutte. Cette situation révèle le fait que la conversion au goutte-à-goutte est difficile à mettre en œuvre sur les réseaux collectifs où il faudrait que tous les utilisateurs adoptent ce système pour pouvoir adapter la pression du réseau et faire par conséquent d'énormes économies d'énergie... De fait, dans le Sud-Est par exemple, les compagnies d'aménagement, lorsqu'elles refont leurs stations de pompage, diminuent les consignes de pression pour se rapprocher des besoins de l'irrigation basse pression, à charge des agriculteurs de surpresser en entrée de parcelle s'ils en ont besoin.

*Résultats*

Tableau 15. Consommation énergétique (kWh/m$^3$) du pivot et du goutte-à-goutte enterré. Economie d'énergie réalisée sur la campagne 2012

| | **Pivot** | **Goutte-à-goutte enterré** | |
|---|---|---|---|
| Débit pompe (m$^3$/h) | 20 | 20 | |
| Pression sortie de pompe (bars) | 5 | 2,5 | |
| Pression entrée système (pied de pivot ou entrée de peigne) | 4,5 | 2 | |
| Modèle pompe | Grundfos CR20 x 4 | Grundfos CR20 x 2.2 | |
| Puissance moteur pompe (kW) | 5,5 | 2,2 | |
| Nombre de passages | 12 | 18 | 25 |
| Durée d'un passage (h) | 60 | 2,5 | 3,75 |
| Durée de fonctionnement sur la campagne (h) | 720 | 139 | |
| Consommation énergétique totale (kWh) | 3 960 | 305,8 | |
| Surface irriguée (ha) | 8,8 | 1,3 | |
| **Consommation énergétique (kWh/ha)** | **450** | **235** | |
| Apport d'irrigation (m$^3$/ha) | 2 210 | 1 750 | |
| **Consommation énergétique (kWh/m$^3$)** | **0,20** | **0,13** | |
| **Economie d'énergie** | | **33 %** | |

**L'économie d'énergie peut être estimée à 33 % entre le système irrigué par pivot et le système goutte à goutte enterré selon les conditions climatiques de l'année 2012** (tableau 15)**.**

### 3.2.6. Chambre d'agriculture du Tarn (2014)

*Méthodologie*

La Chambre d'agriculture du Tarn, en collaboration avec la RAGT Semences et la société Soverdi, a développé un projet commun d'irrigation localisée par goutte-à-goutte sur une parcelle pilote d'agriculteur de la commune de Parisot (Gabriel, 2015). L'objectif était d'obtenir des données comparatives entre l'irrigation par enrouleur et par goutte-à-goutte sur de multiples aspects : consommations en eau, en intrants, en énergie et en main d'œuvre. La parcelle de 13 ha est scindée en deux : 5 ha irrigués en goutte-à-goutte semi-enterré (quelques centimètres de profondeur) et 8 ha irrigués à l'enrouleur. La culture est le maïs. La réserve utile sur tout le profil racinaire du maïs est de 227 mm. Les consommations détaillées ci-dessous concernent l'année 2014, année particulièrement pluvieuse avec apports d'irrigation réduits : 88 mm avec l'enrouleur et 70 mm avec le goutte-à-goutte semi-enterré, contre environ 250 mm avec l'enrouleur et 200 mm avec le goutte-à-goutte en année dite « normale ».

*Résultats*

**L'économie d'énergie réalisée avec le goutte-à-goutte par rapport à l'enrouleur s'élève à 76% sur la campagne 2014** (tableau 16).

Du point de vue financier, l'économie engendrée par l'utilisation du goutte-à-goutte sur le volet électricité s'élève à **45 €/ha** (coût électricité hors abonnement) en 2014, année pluvieuse. Sur une année dite « normale », avec un apport de 250 mm avec l'enrouleur et 200 mm (20% d'économie d'eau) en goutte-à-goutte, elle s'élèverait à **128 €/ha**.

Tableau 16. Consommation énergétique (kWh/m$^3$) de l'enrouleur et du goutte-à-goutte semi-enterré sur la campagne 2014 et économie d'énergie réalisée. Economie financière sur la campagne 2014 et *sur une année dite « normale » compte-tenu d'une économie d'eau potentielle de 20% avec le goutte-à-goutte*

| | Enrouleur | Goutte-à-goutte semi-enterré |
|---|---|---|
| Débit pompe (m$^3$/h) | 30 | 25 |
| Puissance moteur pompe (kW) | 22 | 5,5 |
| **Consommation énergétique (kWh/m$^3$)** | **0,63** | **0,15** |
| **Economie d'énergie** | | **76 %** |
| Apport d'irrigation en 2014 (m$^3$/ha) | 880 | 700 |
| *Apport d'irrigation théorique en année « normale » (m$^3$/ha)* | *2 500* | *2 000* |
| Coût électricité hors abonnement (c€/kWh) | 10 | 10 |
| Coût électricité hors abonnement sur la saison 2014 (c€/m$^3$) | 6,3 | 1,5 |
| Coût électricité hors abonnement sur la saison 2014 (€/ha) | 55,44 | 10,50 |
| **Economie financière sur la saison 2014 (€/ha)** | | **45** |
| *Coût électricité hors abonnement en année « normale » (€/ha)* | *158* | *30* |
| ***Economie financière en année « normale » (€/ha)*** | | ***128*** |

### 3.2.7. Synthèse des données relatives aux consommations énergétiques globales des systèmes d'irrigation alimentés par station de pompage individuelle

Dans le tableau 17 sont compilées les consommations énergétiques (en kWh/m$^3$) des installations d'irrigation individuelles détaillées précédemment. Ces consommations globales intègrent l'énergie nécessaire au pompage, au transport, à la distribution à la parcelle et à l'application. Elles sont donc très dépendantes des caractéristiques de l'installation, en particulier de la topographie et des pertes de charge lors du transport et de la distribution (dénivelé, distance entre la parcelle et la station de pompage).

Le peu de données collectées pour les systèmes à énergie thermique ne permet pas de mettre en évidence des différences de consommations entre les enrouleurs et les pivots. Les consommations des installations électriques à enrouleur et à pivot/rampe/hippodrome sont celles pour lesquelles on dispose de plus de données mesurées. La consommation moyenne globale des **enrouleurs** est de **0,54 kWh/m$^3$**, avec un minimum de 0,43 et un maximum de 0,68. Le choix a été fait de regrouper dans un même ensemble **pivot/rampe/hippodrome et couverture intégrale**, étant données leurs consommations très proches : moyenne de **0,43 kWh/m$^3$** (0,20 à 0,53). On ne dispose que de deux données de **goutte-à-goutte** dont la consommation moyenne est **0,14 kWh/m$^3$** (0,13 à 0,15). Même si la consommation énergétique globale intègre la consommation en amont de la parcelle, on retrouve le même classement que pour les systèmes à la parcelle, à savoir enrouleur > pivot/rampe/hippodrome/couverture intégrale > goutte-à-goutte. Des économies d'énergie possibles entre les différents systèmes apparaissent. Bien que leur généralisation ne soit pas raisonnable compte tenu de la grande diversité des situations, elles sont données à titre indicatif dans le tableau 18 : de l'ordre de 20% pour le passage de l'enrouleur vers un système pivot/rampe/hippodrome/couverture intégrale, 70% pour le passage de l'enrouleur vers le goutte-à-goutte, et 60% pour le passage pivot/rampe/hippodrome ou couverture intégrale vers le goutte-à-goutte. **Attention, ces économies**

**sont envisageables sous réserve que le changement de système soit accompagné d'une adaptation de la pompe aux caractéristiques du nouveau système.**

Notons également que, à l'issue du projet EDEN (volet irrigation), Arvalis a mis au point une méthodologie de calcul du besoin en énergie d'un système d'irrigation, dont le code est déjà développé sous R. Il serait intéressant lui donner une suite pour la rendre opérationnelle (développement de l'interface, maintenance…). Cette méthodologie pourrait être valorisée avec profit pour le calcul des économies d'énergies potentielles. Elle pourrait également être enrichie d'un volet économies d'eau, voire économies de main d'œuvre.

Tableau 17. Voir page suivante

Tableau 18. Economies potentielles d'énergie lors d'un changement de système d'irrigation alimenté par station de pompage individuel (systèmes électriques)

| **Economie d'énergie** ➡ | Pivot/rampe<br>Couverture intégrale | Goutte-à-goutte |
|---|---|---|
| Enrouleur électrique | **20 %** | **70 %** |
| Pivot/rampe<br>Couverture intégrale | | **60 %** |

Tableau 17. Synthèse des consommations énergétiques observées (kWh/m$^3$) de systèmes d'irrigation alimentés par station de pompage individuelle

| | **Système d'irrigation** | | | Enrouleur | Pivot | Rampe | Hippodrome | Couverture intégrale | Goutte-à-goutte | Enrouleur | Pivot |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **Source d'énergie** | | | Electrique | Electrique | Electrique | Electrique | Electrique | Electrique | Thermique | Thermique |
| **CEMAGREF** | Mesures | Moyennes | 2009 | 0,46 | 0,47 | 0,45 | | | | 1,47 | 1,39 |
| | | | | | | | | | | | |
| **EDEN - Haute-Garonne** | Mesures | Moyennes | 2012-2014 | 0,68 | 0,42 | | | 0,41 | | | |
| | Mesures | Moyennes | 2015 | 0,51 | 0,44 | | | | | | |
| **EDEN - Lot et Garonne** | Mesures | Moyennes | 2012-2014 | 0,44 | | | | | | | |
| | Mesures | | 2013-2014 | | | | | | | 1,62 | |
| | | | | | | | | | | | |
| **Arvalis** | Mesures | | 2017 | 0,63 | 0,49 | | 0,53 | | | 0,98 | |
| | Mesures | | 2017 | 0,43 | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| **GRCETA SFA** | Mesures | Moyennes | 2007 | | 0,43 | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| **Chambre d'Agriculture 81** | Mesures | | 2014 | 0,63 | | | | | 0,15 | | |
| | | | | | | | | | | | |
| **Chambre d'Agriculture 40** | Calcul | | 2012 | | 0,20 | | | | 0,13 | | |
| | | | | | | | | | | | |
| **MOYENNES (systèmes électriques)** | | | | **0,54** | **0,41** | **0,45** | **0,53** | **0,41** | **0,14** | **1,36** | **1,39** |
| **MOYENNES (systèmes électriques)** | | | | **0,54** | **0,43** | | | | **0,14** | | |
| **Min – Max (systèmes électriques)** | | | | **0,43 - 0,68** | **0,20 - 0,53** | | | | **0,13 - 0,15** | | |

# 4. Comment réaliser des économies de main d'œuvre ?

Les besoins en main d'œuvre sont ventilés en (1) besoins fixes, constants quelle que soit la durée d'utilisation du matériel sur la campagne : pose en début de campagne, dépose en fin de campagne et entretien ; (2) besoins variables, fonction du nombre de tours d'eau de la campagne : déplacement de l'enrouleur, ouverture/fermeture des vannes, observation, surveillance en cours de campagne.

## 4.1. Grandes cultures

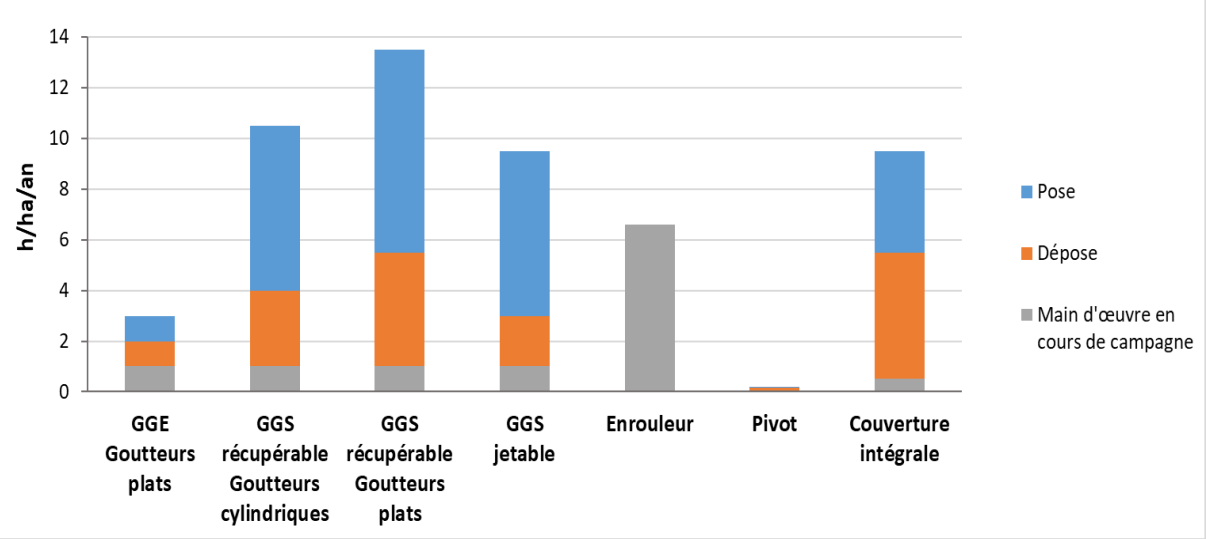


Figure 19. Temps de main d'œuvre sur une campagne pour différents systèmes d'irrigation en grandes cultures (GGE : goutte-à-goutte enterré, GGS : goutte-à-goutte de surface). Cas d'une installation fictive de 30 ha de maïs avec apport d'eau de 200 mm (débit maximum de 6 mm/jour). D'après Pagliarino (2012) et Arvalis (2017).

La figure 19 présente la répartition du temps de main d'œuvre nécessaire pour une campagne d'irrigation, sachant qu'en grandes cultures, à l'exception du pivot et du goutte-à-goutte enterré, les systèmes d'irrigation sont retirés de la parcelle à la fin de chaque campagne. Le canon enrouleur ne nécessite pas d'opération particulière en début et fin de campagne, par contre les déplacements entre chaque position sont gourmands en temps (en moyenne 1h entre chaque position, à augmenter si les parcelles sont éloignées). Inversement, la couverture intégrale demande un temps de pose et dépose annuelles important mais, si l'installation est automatisée, peu de temps en cours de campagne. Le pivot, une fois installé pour toute sa durée de vie, ne nécessite que très peu de temps de supervision en début, fin et cours de campagne. Remarquons que le temps de main d'œuvre pour le pivot présenté par Arvalis sur ce graphique pourrait être rallongé jusqu'à 1h/ha/an à partir de la 5$^{ème}$ année d'utilisation pour tenir compte de réparations telles que changement de busage, nettoyage de canalisations, changement de roues, de moteur, de rupteurs, etc…

La pose du goutte-à-goutte de surface (GGS) demande un temps important de mise en place au début de chaque saison avec l'intervention de 2 à 3 personnes simultanément : 6,5 à 8 h/ha pour dérouler les lignes de goutteurs et les raccorder à la ligne d'amenée. La dépose nécessite 2 à 4,5 h/ha pour débrancher les lignes de goutteurs puis les rembobiner. Dans le cas de gaines récupérables la dépose est plus délicate et longue puisqu'il ne faut pas endommager les gaines qui seront réutilisées. En cours de saison, le temps passé consiste à surveiller le bon fonctionnement des installations et les nettoyer

(observations de la culture et de l'état hydrique visuel du sol en surface, vérification des volumes apportés, traitements acide et/ou chlore).

Pour le goutte-à-goutte enterré (GGE), le plus gros chantier est celui de l'installation : tranchée de chaque côté de la parcelle pour la ligne d'amenée et pour la ligne de purge, pose des lignes de goutteurs à la sous-soleuse, raccordement des lignes rassemblées par peigne aux lignes d'amenée et de purge, rebouchage des tranchées. La dépose consiste à retirer les lignes de goutteurs enterrées à l'aide d'un soc qui ouvre la tranchée. Ce travail est coûteux en temps et compliqué, en particulier s'il faut retrouver les gaines qui n'ont pas été posées avec des systèmes de guidage et de géo-référencement. Il arrive que des agriculteurs n'utilisant plus ce système d'irrigation laissent les gaines enterrées en place. En goutte-à-goutte enterré, le travail en cours de campagne (1 h/ha) consiste uniquement, comme pour le GGS, à veiller au bon fonctionnement du système. Il faut également ajouter 1 h/ha pour la mise en route et 1 h/ha pour l'arrêt en fin de campagne (purge, traitement à l'acide, chloration…), ce qui élève le temps nécessaire à 3 h/ha pour une campagne (hors installation initiale).

En comparaison avec le temps exigé pour l'irrigation avec l'enrouleur, le pivot ne nécessite quasiment pas de main d'œuvre en cours de campagne et le goutte-à-goutte enterré permet une réduction du temps de main d'œuvre de 50% environ. Inversement, sur une campagne d'irrigation, le goutte-à-goutte de surface récupérable exige 80% de temps supplémentaire, la couverture intégrale et le goutte-à-goutte de surface jetable 45% de temps supplémentaire (tableau 19).

Tableau 19. Temps de main d'œuvre total pour une campagne avec différents systèmes d'irrigation en **grandes cultures** (GGE : goutte-à-goutte enterré, GGS : goutte-à-goutte de surface). D'après Pagliarino (2012) et Arvalis (2017).

| Besoin en temps | GGE | GGS récupérable | GGS jetable | Enrouleur | Pivot | Couverture intégrale |
|---|---|---|---|---|---|---|
| (h/ha/an) | 3 | 12 | 9,5 | 6,6 | 0,2 | 9,5 |
| **Comparaison avec l'enrouleur (%)** | **- 55 %** | **+ 82 %** | **+ 44 %** | **---** | **- 97 % ??** | **+ 44 %** |
| **Comparaison avec la couverture intégrale (%)** | **- 68 %** | **+ 26 %** | **0 %** | **- 31 %** | **- 98 %** | **---** |
| **Comparaison avec le GGS récupérable (%)** | **- 75 %** | **---** | **- 21 %** | **- 45 %** | **- 98 %** | **- 21 %** |
| **Comparaison avec le GGS jetable (%)** | **- 68 %** | **+ 26 %** | **---** | **- 31 %** | **- 98 %** | **0 %** |

*Exemple de terrain : irrigation du maïs dans le Tarn en goutte-à-goutte semi-enterré*

L'objectif du projet était d'obtenir des données comparatives entre l'irrigation par enrouleur et par goutte-à-goutte semi-enterré (quelques centimètres de profondeur) sur les consommations en eau, intrants, énergie et main d'œuvre (Gabriel, 2015). L'analyse du besoin en main d'œuvre a été réalisée pour une année à pluviométrie moyenne.

Le déplacement de l'enrouleur entre deux positions nécessite 0,5 heure. La parcelle de 8,5 ha est irriguée par 3 passages d'enrouleur. Sur une année à pluviométrie moyenne, 15 tours d'eau sont

réalisés par campagne, soit 45 passages d'enrouleur sur cette parcelle, soit 22,5 heures de travail sur la campagne pour 8,5 ha. Le besoin moyen en temps pour l'irrigation par enrouleur est donc de **2,7 h/ha/an** (soit environ 40 €/ha/an, sur la base d'un coût horaire en main d'œuvre de 15 €).

La mise en place du goutte-à-goutte semi-enterré a nécessité 16 h pour les 5 ha (soit 3,2 h/ha) et la dépose du système après récolte 8h (1,6 h/ha). En cours de campagne, le système d'irrigation par goutte-à-goutte ne réclame pas de temps de main d'œuvre puisqu'il est totalement automatisé. Seule une surveillance doit être effectuée. Le besoin moyen en main d'œuvre pour le goutte-à-goutte s'élève à **4,8 h/ha/an** (soit environ 72 €/ha/an, sur la base d'un coût horaire de 15 €).

Le système du goutte-à-goutte de surface est donc plus chronophage que l'enrouleur : environ **+75% de temps supplémentaire sur la campagne** (soit +30€/ha/an) pour la main d'œuvre du goutte-à-goutte, avec une répartition dans le temps différente (demande du temps avant le démarrage de la campagne et après la récolte pour le goutte-à-goutte et tout au long de la campagne pour l'enrouleur).

## 4.2. Maraîchage et arboriculture

En aspersion, le système utilisé est principalement la **couverture intégrale classique** (3,5 à 5,0 bars), rarement l'enrouleur, qui nécessite de disposer les rampes sur la parcelle et les équiper de l'ensembles des asperseurs. En général, la mise en place de la couverture intégrale nécessite pour un hectare : un tracteur, une remorque, 2 personnes et 1 h/personne. Le même matériel et besoin en main d'œuvre est nécessaire pour la phase de démontage. Soit en tout environ 4 h/ha pour la pose et la dépose, temps qui peut varier avec le parcellaire et la topographie (Siri et Boyer, 2006).

La **mini ou micro-aspersion** (2,5 à 3,5 bars) est coûteuse en temps de pose, même si celle-ci est mécanisée. Un tracteur maintient la bobine sur un châssis en position de déroulement. Un deuxième tracteur déroule la bobine et tire le tube polyéthylène sur la parcelle. Le tube est ensuite coupé en bout de rang et fermé par un bouchon. Le perçage des trous dans le tube polyéthylène et le montage préalable des mini-asperseurs + supports de pique + piques métalliques sont nécessaires lors de la première pose. Cette tâche est assez longue car le nombre d'asperseurs est plus important qu'en couverture intégrale. A la dépose en fin de campagne, l'enroulement du tube rond sur la bobine se fait en bord de champ avec une enrouleuse. Cette phase est délicate car le tube doit être enroulé de manière régulière et avec précaution pour éviter qu'il ne s'écrase. Il existe aujourd'hui sur le marché un tube ovalisé qui simplifie cette opération. Afin de remplir la bobine et de réutiliser le tuyau sur une parcelle de dimension différente l'année suivant, il est nécessaire de manchonner les tubes entre eux soit par des raccords à compression, soit par soudure directe de tube à tube (méthode la plus utilisée), soit avec des manchons thermosoudables (plus rapide mais plus cher). Cette phase nécessite un équipement spécial (machine à souder) et des conditions climatiques qui ne doivent pas être trop froides (> 10°C) pour que le tube s'enroule et se soude dans de bonnes conditions (Siri et Boyer, 2006). A noter que les installations ne sont pas démontées en cultures pérennes.

Le **goutte-à-goutte** est essentiellement de surface (parfois enterré) en maraîchage, simple ou double rampe, jetable ou réutilisable. En arboriculture, il peut être de surface, suspendu ou enterré. Dans ce dernier cas, il est en général installé à la plantation du verger. Le goutte-à-goutte de surface peut être constitué de gaines avec **goutteurs intégrés,** ou bien de **goutteurs « boutons »** fixés en dérivation sur les gaines.

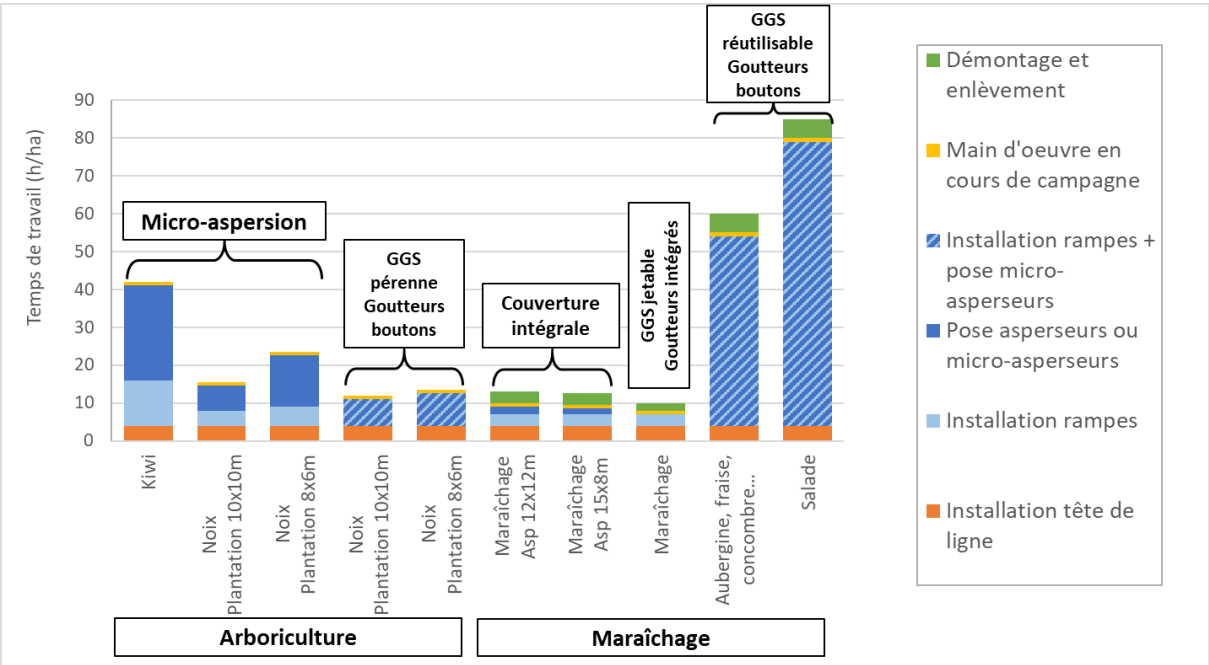


Figure 20. Exemples de temps de main d'œuvre pour la pose et la dépose de différents systèmes d'irrigation, au cours de la **première campagne d'utilisation**, hors temps d'ouverture et rebouchage des tranchées. GGS : goutte-à-goutte de surface. Les goutteurs du GGS sont soit intégrés aux gaines, soit de type « boutons » fixés manuellement en dérivation sur la gaine. D'après MAAPR (2005) et MAP (2007).

### 4.2.1. Maraîchage

La figure 20 présente les temps de main d'œuvre nécessaires à l'irrigation au cours de la **première campagne d'utilisation** du système. L'installation de la ligne de tête, estimée à 4 h/ha est comptabilisée à chaque première campagne, quel que soit le système. Pour tous les systèmes, le temps de travail nécessaire en cours de campagne est équivalent à celui des grandes cultures si les installations sont automatisées : environ 1 h/ha pour la supervision et le contrôle du fonctionnement. Les temps de pose et dépose diffèrent d'un système à l'autre.

En **couverture intégrale**, la pose et la dépose doivent avoir lieu à chaque campagne et sont estimées entre 7,5 et 8 h/ha en fonction de la densité du maillage d'asperseurs (figure 20), ce qui est proche de l'estimation en grandes cultures (9 h/ha, figure 19). Le **GGS réutilisable avec goutteurs boutons** en dérivation sur la gaine est le système le plus gourmand en temps : entre 60 et 85 h/ha pour la première campagne. L'insertion manuelle des goutteurs demande 50 h/ha pour l'aubergine, la fraise, la courgette, le concombre, et autres cultures maraîchères, et 75 h/ha pour la salade en raison d'une densité de plants supérieure à l'hectare. Le démontage demande également plus de temps que le GGS jetable puisqu'il faut enrouler proprement les rampes sans les endommager. Le **GGS jetable avec goutteurs intégrés** ne nécessite au total que 10 h/ha car la pose n'intègre que le déroulement des gaines sans montage des goutteurs et la dépose est moins délicate donc plus rapide.

A partir de la deuxième campagne d'utilisation, c'est-à-dire sans le temps nécessaire à la première installation du système, la couverture intégrale nécessite un temps de main d'œuvre de 8,75 h/ha, le goutte-à-goutte de surface jetable 6 h/ha, le goutte-à-goutte de surface réutilisable 81 h/ha pour la salade et 56 h/ha pour les autres cultures maraîchères (tableau 20). Pour le goutte-à-goutte enterré, système fixe après l'installation initiale, pour le temps de travail en cours de campagne, en plus du contrôle du fonctionnement (1 h/ha), il faut compter 1h/ha pour le contrôle de mise en route en début

de campagne et 1h/ha pour l'arrêt (purge…) en fin de campagne, d'où un total estimé à 3 h/ha. En comparaison avec la couverture intégrale, le goutte-à-goutte de surface jetable représente une économie de temps de 30% environ, le goutte-à-goutte enterré une économie de 66%, alors que le goutte-à-goutte réutilisable multiplie le temps nécessaire par 5 à 8 fois.

Tableau 20. Temps de main d'œuvre total **à partir de la deuxième campagne d'utilisation** avec différents systèmes d'irrigation en **maraîchage** (temps d'installation initiale exclu) ; comparaison avec la couverture intégrale

| Besoin en temps | Couverture intégrale | Goutte-à-goutte enterré | Goutte-à-goutte de surface jetable avec goutteurs intégrés | Goutte-à-goutte de surface réutilisable avec goutteurs boutons en dérivation | |
|---|---|---|---|---|---|
| (h/ha/an) | Toutes cultures | Toutes cultures | Toutes cultures | Aubergine, fraise, concombre… | Salade |
| Installation rampes | 3 | 0 | 3 | | |
| Pose asperseurs ou micro-asperseurs | 1,75 | 0 | 0 | | |
| Installation rampes + pose micro-asperseurs | | | | 50 | 75 |
| Démontage et enlèvement | 3 | 0 | 2 | 5 | 5 |
| **TOTAL pose et dépose** | **7,75** | | **5** | **55** | **80** |
| Main d'œuvre en cours de campagne | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 |
| **TOTAL campagne** | **8,75** | **3** | **6** | **56** | **81** |
| **Comparaison avec la couverture intégrale** | **---** | **- 66 %** | **- 31 %** | **+ 540 %** | **+ 826 %** |
| **Comparaison avec le goutte-à-goutte de surface jetable** | **+ 46 %** | **- 50 %** | **---** | | |

*Exemple de terrain : irrigation de salades sous tunnel en goutte-à-goutte de surface (Ardepi, 2006)*

L'objectif de l'essai était de comparer deux techniques d'irrigation de salade sous abri (goutte à goutte de surface et micro-aspersion), afin d'améliorer l'efficience de l'irrigation en goutte à goutte et de réaliser un bilan économique et phytosanitaire des deux conduites (Boyer et Goillon, 2006).

Le système d'aspersion est la micro-aspersion pendulaire tête en bas. Le système de goutte-à-goutte de surface est composé de gaines souples T-Tape épaisseur 150 µm avec goutteurs espacés de 0,20 m, distantes de 0,50 m. Le temps de pose manuelle s'est élevé à 4h pour poser 15 lignes de 118 m dans un tunnel de 920 $m^2$ et réaliser les branchements, ce qui équivaut à 40 h/ha. Ce temps est bien supérieur à ceux décrits ci-dessus car les lignes ont été posées manuellement. Ce temps peut être réduit en mécanisant la pose au moment de la plantation.

*Exemple de terrain : irrigation d'aspergeraies en goutte-à-goutte de surface (dire d'expert)*

L'asperge est irriguée en gravitaire, en aspersion ou en goutte-à-goutte (de surface ou enterré) qui présente l'intérêt de permettre la fertigation et de limiter les maladies foliaires. Le goutte-à-goutte de

surface doit cependant être monté et démonté chaque année. A dire d'expert, le temps de main d'œuvre nécessaire à l'irrigation sur une campagne en France (tableau 21) est de 25 h/ha en couverture contre 11 h/ha en goutte-à-goutte de surface ce qui représente une **économie de main d'œuvre légèrement supérieure à 50% avec le goutte-à-goutte**. Notons que la durée de 2 heures nécessaires en aspersion à chaque irrigation semble quelque peu surestimée.

Tableau 21. Temps de main d'œuvre total pour une campagne d'irrigation d'asperges avec différents systèmes (source : Christian BEFVE, consultant asperge)

| | Aspersion Couverture intégrale | Goutte-à-goutte de surface |
|---|---|---|
| Travail afférent à la mise en place (h/ha) | 5 | 6 |
| Travail afférent à chaque irrigation (h/ha) | 2 | 0,25 |
| Nombre d'irrigations sur la campagne | 10 | 20 |
| **TOTAL travail campagne (h/ha)** | **25** | **11** |

### 4.2.2. Arboriculture

Contrairement au maraîchage, les systèmes d'irrigation restent en place dans les vergers, ce qui restreint le temps de pose à la première saison uniquement et supprime le temps de dépose à chaque saison. En micro-aspersion et GGS goutteurs boutons, le temps d'installation des rampes et de pose des micro-asperseurs ou goutteurs augmente avec la densité de plantation, donc d'asperseurs/goutteurs, qui est plus importante pour les kiwis que pour les noyers (figure 20). Dans l'exemple des noyers, la pose des goutteurs boutons est moins longue que celle des micro-asperseurs. Elle est également réduite par rapport au maraîchage puisque la densité de plantation est plus faible. Comme en maraîchage, le temps de travail en cours de campagne peut être estimé à environ 1 h/ha. A partir de la deuxième campagne, le temps d'installation et de dépose n'est plus à prendre en compte. Tous les systèmes deviennent alors équivalents avec 1 h/ha de supervision et surveillance.

## 4.3. Autres éléments liés aux économies de main d'œuvre

Outre la durée de travail lié à la pose, la dépose et la surveillance en cours de campagne, le choix du système d'irrigation peut influencer indirectement d'autres postes de travail comme la **gestion des adventices**. Un essai conduit de 2009 à 2012 à la SERAIL (Station d'Expérimentation Rhône-Alpes Information Légumes) sur culture d'oignons conduite en bio montre que le goutte-à-goutte de surface, et encore davantage le goutte-à-goutte enterré, restreignent significativement le développement d'adventices dénombrées en juillet 2009 (figure 21). Le temps de travail de binage et désherbage s'en trouve donc réduit (figure 22). En 2011, en comparaison avec l'aspersion, le goutte-à-goutte de surface permet à lui seul de réduire le nombre d'heures de travail de près de 40%, presque autant que le paillage (50%). La combinaison goutte-à-goutte de surface + paillage réduit le temps de près de 85% en 2011 et 2012.

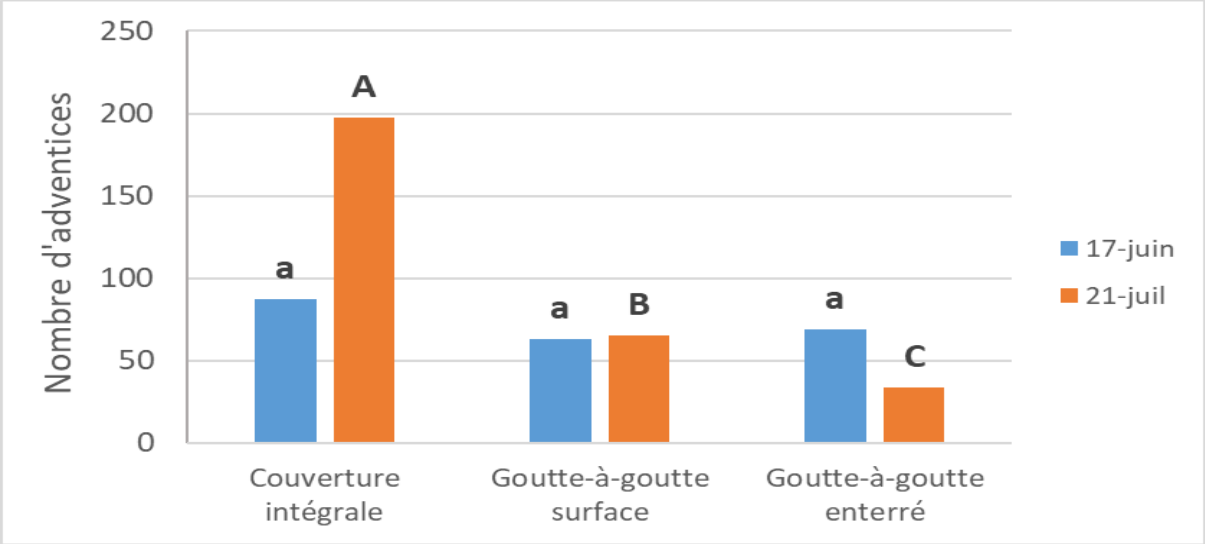


Figure 21. Essai conduit à la SERAIL (Station d'Expérimentation Rhône-Alpes Information Légumes) en 2009. Irrigation d'oignons bio avec différents systèmes. Dénombrement d'adventices (nombre cumulé) pour 4 lancés de cadre (0,36 $m^2$) de comptage. Analyse de variance par date : les traitements avec lettre différente sont significativement différents (SERAIL 2009, d'après Guerpillon et al, 2009).

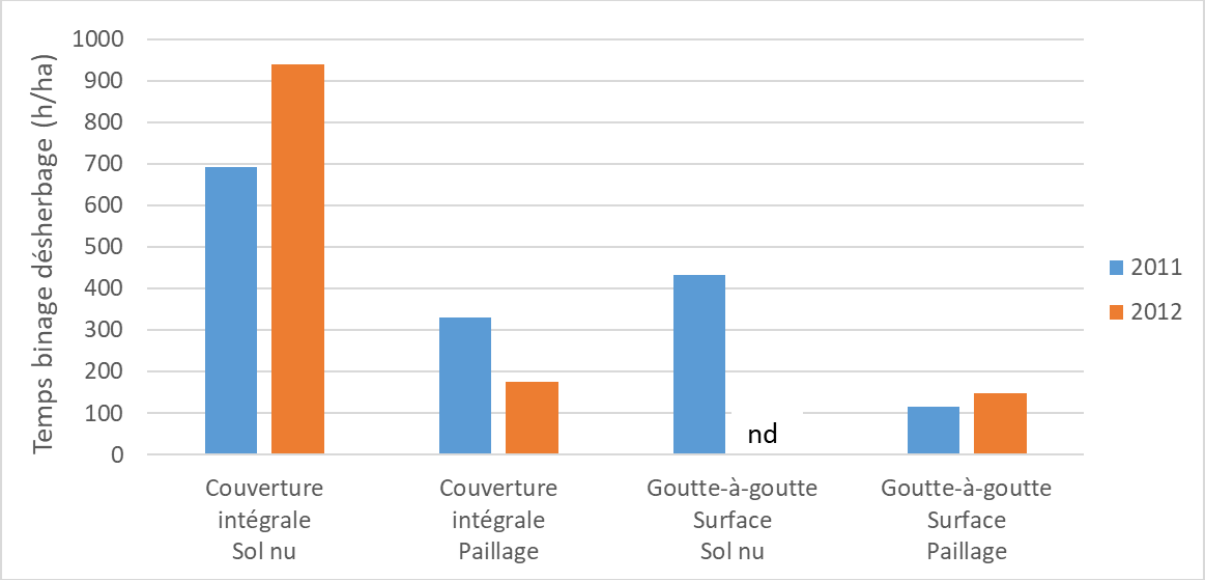


Figure 22. Essai conduit à la SERAIL (Station d'Expérimentation Rhône-Alpes Information Légumes) de 2009 à 2012. Irrigation d'oignons bio avec différents systèmes. Temps de travail pour binage et désherbage (nd : non déterminé) (d'après Guerpillon, 2013).

Par ailleurs, les systèmes d'irrigation localisée ne mouillent pas l'ensemble du feuillage, ce qui réduit significativement le développement de maladies cryptogamiques. Le temps de **passage d'engins pour la pulvérisation** de traitements phytosanitaires est donc diminué. Jusqu'à 3 ou 4 traitements fongicides par an peuvent être supprimés sur un verger grâce à un système localisé. Enfin, en goutte-à-goutte enterré, puisque aucun tuyau n'affleure en surface, les **opérations culturales** telles le broyage de l'herbe ou des bois de taille en arboriculture est plus aisé, d'où un gain de temps.

## 4.4. Synthèse : les économies de main d'œuvre réalisables

Les tableaux 22 et 23 présentent les économies moyennes de temps de travail sur une campagne auxquelles on peut s'attendre lors d'un changement de système d'irrigation. Ils ont été obtenus à partir des besoins en temps détaillés précédemment. Ils ne tiennent pas compte des temps d'installation initiale des systèmes (pivot et GGE). Les économies en maraîchage permises par le GGS récupérable avec goutteurs intégrés ont été obtenues en extrapolant les besoins en temps du GGS jetable et du GGS récupérable avec goutteurs boutons en dérivation, en comptant 3 h/ha pour l'installation des rampes, 4 h/ha pour le démontage/enlèvement et 1h/ha de travail en cours de campagne, soit un total de 8 h/ha.

En grandes cultures, le pivot permet l'économie de main d'œuvre la plus conséquente (95%), quel que soit le système de départ. Il est suivi par le goutte-à-goutte enterré (55 à 75%) puis l'enrouleur (30 à 45%).Le goutte-à-goutte de surface récupérable, très gourmand en temps, ne permet en aucun cas de réaliser des économies de main d'œuvre, avec une perte de temps de 25 à 80%. Le goutte-à-goutte de surface jetable et la couverture intégrale sont équivalents en termes d'exigence en temps. Ils ne sont économes en temps (20%) qu'en comparaison du goutte-à-goutte de surface récupérable.

En maraîchage, le goutte-à-goutte enterré est le système le plus économe en temps (50 à 90% d'économie de temps). Le GGS jetable avec goutteurs s'avère légèrement moins économe (25 à 90%). Le GGS récupérable avec goutteurs intégrés et la couverture intégrale ne permettent des économies que par rapport au GGS récupérable avec goutteurs boutons en dérivation (80 à 85%). Ce dernier système, très exigeant en temps en raison de la pose des goutteurs en dérivation, nécessite au moins 5 fois plus de temps que tous les autres systèmes.

Tableau 22. Economies de temps de main d'œuvre réalisables en **grandes cultures** sur une campagne, sans tenir compte des temps d'installation initiale du système (pivot et GGE). GGE : goutte-à-goutte enterré, GGS : goutte-à-goutte de surface. Les valeurs négatives représentent un gain (économie) de temps, les valeurs positives une perte de temps.

| **Economie de temps de main d'œuvre** ➡ | Pivot | GGE | Enrouleur | GGS jetable | GGS récupérable | Couverture intégrale |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Enrouleur | **- 95 %** | **- 55 %** | --- | **+ 40 %** | **+ 80 %** | **+ 40 %** |
| GGS jetable | **- 95 %** | **- 65 %** | **- 30 %** | --- | **+ 25 %** | **0 %** |
| GGS récupérable | **- 95 %** | **- 75 %** | **- 45 %** | **- 20 %** | --- | **- 20 %** |
| Couverture intégrale | **- 95 %** | **- 65 %** | **- 30 %** | **0 %** | **+ 25 %** | --- |

Tableau 23. Economies de temps de main d'œuvre réalisables en **maraîchage** sur une campagne, sans tenir compte des temps d'installation initiale du système (GGE). GGE : goutte-à-goutte enterré, GGS : goutte-à-goutte de surface. Les valeurs négatives représentent un gain (économie) de temps, les valeurs positives une perte de temps.

| **Economie de temps de main d'œuvre** ➡ | GGE | GGS jetable avec goutteurs intégrés | GGS récupérable avec goutteurs intégrés | GGS récupérable avec goutteurs boutons en dérivation | Couverture intégrale |
|---|---|---|---|---|---|
| GGS jetable avec goutteurs intégrés | **- 50 %** | **---** | **+ 30 %** | **> 500 %** | **+ 45 %** |
| GGS récupérable avec goutteurs intégrés | **- 60 %** | **- 25 %** | **---** | **> 500 %** | **0 %** |
| GGS récupérable avec goutteurs boutons en dérivation | **- 90 %** | **- 90 %** | **- 85 %** | **---** | **- 80 %** |
| Couverture intégrale | **- 65 %** | **- 30 %** | **0 %** | **> 500 %** | **---** |

Pour toutes les cultures, le goutte-à-goutte enterré permet d'importantes économies de temps, ainsi que le goutte-à-goutte de surface jetable dans une moindre mesure. Au contraire, le goutte-à-goutte de surface récupérable, requérant une dépose délicate et longue, demande plus de temps que tous les autres systèmes. Il est cependant important de considérer que le goutte-à-goutte réutilisable réduit considérablement la production de déchets à éliminer et traiter ; il représente donc un système plus durable et respectueux de l'environnement que son homologue jetable. De plus, même si des systèmes de goutte-à-goutte nécessitent relativement peu de main d'œuvre sur une campagne, il ne faut pas oublier qu'ils exigent une technicité importante dans la conception, le pilotage, le contrôle et l'entretien du dispositif.

Du point de vue économique, les besoins en temps de main d'œuvre relatif au matériel d'irrigation sont également à relier aux autres coûts relatifs aux équipements d'irrigation, à savoir les charges fixes de matériel pour l'accès à la ressource (forage…), le pompage, le transport, la distribution et l'application : amortissement, frais financiers, entretien, réparations, assurances. La figure 23 présente l'ensembles de ces coûts pour divers systèmes d'irrigation en grandes cultures (Arvalis, 2017). La couverture intégrale et le goutte-à-goutte jetable présentent le même besoin en main d'œuvre (figure 19) mais le goutte-à-goutte jetable est deux fois plus cher (750 €/ha/an) que la couverture intégrale (352 €/ha/an) si on examine les coûts totaux de matériel. La couverture intégrale est le système le moins coûteux en matériel, mais dépasse le pivot et l'enrouleur si on ajoute les charges de main d'œuvre (166 €/ha/an). Le pivot est le système d'aspersion le plus onéreux en investissement mais le moins exigeant en main d'œuvre (5 €/ha/an), ce qui le rend globalement le moins cher. Les installations de goutte-à-goutte représentent les investissements les plus chers (419 à 722 €/ha/an), avec des coûts de main d'œuvre élevés (164 à 233 €/ha/an) sauf pour le goutte-à-goutte enterré (53 €/ha/an) qui reste cependant plus coûteux que tous les systèmes d'aspersion. Ces aspects sont à considérer

différemment en arboriculture où les systèmes sont pérennes sur la parcelle et ne nécessitent pas de temps de pose et dépose chaque année.

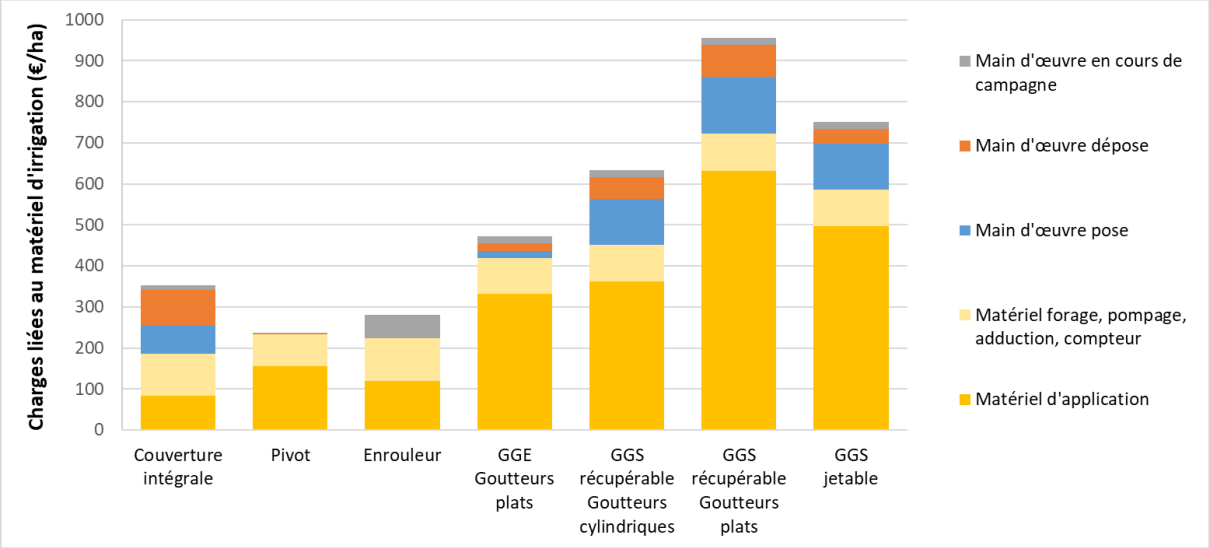


Figure 23. Charges annuelles liées au matériel d'irrigation pour une installation fictive de 30 ha de maïs avec apport d'eau de 200 mm (débit maximum de 6 mm/jour). D'après Arvalis (2017).

# 5. Conclusion générale

Face à la hausse des prix de l'énergie, les économies d'énergie réalisables par un changement de système d'irrigation constituent un élément décisif dans le choix d'une technologie lorsqu'un irrigant envisage de moderniser son système. Ce choix est également influencé par les contraintes d'organisation de l'exploitation et les coûts liés à la main d'œuvre pour l'irrigation. L'objectif de la présente étude, commanditée par le Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation, était de mettre à disposition des agriculteurs un outil leur permettant d'évaluer les **économies d'énergie potentiellement réalisables** lors d'un changement de système d'irrigation, ainsi que les **économies de temps de main d'œuvre**.

Les résultats d'expérimentations et de mesures de terrain relatives aux consommations énergétiques de diverses installations d'irrigation en France ont été rassemblés. Les données collectées ont permis d'établir un **référentiel d'économies d'énergie potentiellement réalisables** par un changement de matériel d'irrigation dans le cas (1) d'une parcelle alimentée par un réseau collectif où le seul levier d'économie d'énergie dont dispose l'irrigant est le choix du matériel d'irrigation à la parcelle ou (2) d'une parcelle alimentée par station de pompage individuelle où une amélioration du matériel à la parcelle peut également s'accompagner d'une amélioration au niveau de la station de pompage et du réseau d'amenée. Parallèlement, des références de besoins en main d'œuvre de différents systèmes ont été compilées pour réaliser un **référentiel d'économies de temps de main d'œuvre** réalisables.

Lors d'un projet de changement de système d'irrigation, les besoins en énergie et main d'œuvre sont à resituer dans un **contexte économique** plus large incluant tous les coûts liés à l'irrigation : charges fixes de matériel (amortissement des équipements de forage, pompage, transport, distribution, application) et de main d'œuvre (installation, entretien) et charges variables (énergie, eau, main d'œuvre). Ces coûts sont à considérer au regard des gains potentiels (rendement, qualité) afin d'évaluer la rentabilité de l'installation envisagée. Rappelons également que tous les systèmes d'irrigation ne sont pas adaptables à toutes les situations. Le facteur économique n'est pas le seul à prendre en compte pour le choix du matériel. L'irrigant peut être amené à considérer d'autres aspects : contraintes du parcellaire, contraintes sur la ressource en eau, organisation et confort du travail, voisinage, performances environnementales, et surtout contraintes de rotation alternant des cultures irriguées ou en sec.

Il est important de souligner que, afin de consolider et affiner les valeurs d'économie potentielles en énergie et en main d'œuvre avancées dans cette étude, **des données plus nombreuses et complémentaires seraient nécessaires**. Il semble pertinent de poursuivre les efforts de diagnostic énergétique des installations, de déployer des méthodologies déjà mises au point à l'instar du projet EDEN. Cela permettrait d'une part d'acquérir de nouvelles références et d'autre part d'améliorer les performances du parc de matériel d'irrigation et la conception de l'infrastructure d'alimentation. Un manque de références se fait ressentir sur des situations particulières comme les parcelles à forte pente. Il serait également intéressant de pouvoir quantifier l'influence de l'entretien des installations (dépôts dans canalisation, colmatage de goutteurs…) sur les performances énergétiques. La mise en place d'un calculateur permettant à l'agriculteur ou au conseiller de faire un diagnostic rapide serait aussi d'un grand bénéfice.

Enfin, il apparaît nécessaire de relier les aspects efficience de l'énergie ET efficience de l'eau, dans une perspective de durabilité à la fois économique et environnementale. Il s'agit de rechercher des indicateurs mettant en évidence que les mesures visant à économiser l'eau permettent aussi d'économiser de l'énergie, afin de valoriser les équipements performants et les pratiques d'irrigation

vertueuses. Il serait par exemple intéressant de quantifier les effets indirects du goutte-à-goutte enterré sur le développement des adventices, le nombre de binages ou d'applications de désherbant. Une **vision intégrée du système de production** s'impose désormais pour étudier en quoi les équipements et les pratiques d'irrigation, associées aux autres pratiques culturales, sont des leviers d'économie conjointes d'eau, d'énergie et de main d'œuvre.

# Références bibliographiques


ADEME, SOLAGRO, CTIFL, ASTREDHOR, ARVALIS, FNCUMA, IDELE, IFIP, ITAVI (2019). "Agriculture et efficacité énergétique : propositions et recommandations pour améliorer l'efficacité énergétique de l'agriculture des exploitations agricoles en France." Rapport ADEME, 85 pages

Arvalis - Institut du végétal, 2017. "Matériels d'irrigation des grandes cultures", Éditions Arvalis, Juin 2017, 48p.

Boyer, I., and Goillon, C. (2006). "Essai goutte à goutte sur laitue sous tunnel froid." C.E.T.A de Saint-Martin de Crau. Rapport ARDEPI. 7 p.

Chambre d'Agriculture des Landes (2012). "Appui technique aux irrigants d'Aquitaine. Essai irrigation par goutte à goutte enterré sur maïs. ." Compte-rendu.

Dejean, C. (2016). "Analyse des résultats du suivi 2016 des pressions d'un canon enrouleur sur parcelle en pente. Economies d'énergie et d'eau possibles par un régulateur de pression à la pompe". Rapport IRSTEA - Arvalis. 10p.

Dejean, C., and Lopez, J. M. (2016). "Appui au suivi et à l'analyse des résultats d'un dispositif expérimental d'irrigation en goutte à goutte enterré sur grande culture. Ferme expérimentale de la Mirandette. Résultats de la 5ème campagne agricole Maïs-2016." Contrat de prestation de services IRSTEA – CACG.

Dejean, C., Lopez, J. M., Albasha, R., and Mailhol, J. C. (2012). "Appui à la mise en place, au suivi et à l'analyse des résultats d'un dispositif expérimental d'irrigation en goutte à goutte enterré sur grande culture. Ferme expérimentale de la Mirandette. Résultats de la campagne agricole Maïs-2012." Rapport de prestation de service IRSTEA - CACG.

Dejean, C., Lopez, J. M., Albasha, R., Mailhol, J. C., and Bozza, J. L. (2013). "Appui à la mise en place, au suivi et à l'analyse des résultats d'un dispositif expérimental d'irrigation en goutte à goutte enterré sur grande culture. Ferme expérimentale de la Mirandette. Résultats de la 2ème campagne agricole Maïs-2013." Contrat de prestation de services IRSTEA – CACG.

Devaud, N. (2017). "Construction d'un outil de diagnostic énergétique des installations d'irrigation." Mémoire pour l'obtention du diplôme d'ingénieur AgroParisTech.

Donnat, E., Boffety, D., Bimonte, S., André, G., Capdeville, J., Deumier, J. M., Gendre, S., Georges, J., Cottais, A., Tailleur, A., Huneau, T., Le Frileux, Y., Dejean, C., Erignoux, A., and J.P., C. (2017). Du capteur à l'indicateur : les entrepôts de données spatiales au service d'une meilleure maîtrise des consommations énergétiques des entreprises agricoles. Innovations Agronomiques 55, 201-214.

Gabriel, H. (2015). "Essai comparatif de l'irrigation par goutte-à-goutte et enrouleur sur maïs semences – Campagne 2014." Rapport Chambre d'Agriculture du Tarn.

Goossens, X. (2000). "Impact des projets d'irrigation en termes de consommation énergétique et d'émission de gaz à effet de serre." Rapport Unviversité Bordeaux 1 - FFEM. 97 p.

Goossens, X. (2005). La maîtrise de la demande en eau et en énergie en agriculture irriguée : De l'évaluation des enjeux à la proposition d'actions ciblées, Thèse de doctorat, Université Bordeaux 1. 250 p.

Granier, J., and Deumier, J. M. (2013). Efficience hydraulique et énergétique : les nouveaux critères de performances pour les systèmes d'irrigation du futur. Sciences, Eaux et Territoires 11, 30-35.

Guerpillon, E. (2013). "Conduite d'itinéraire technique – production d'oignons paille en culture biologique." Rapport SERAIL.

Guerpillon, E., Icard, C., and Treuvey, N. (2009). "Oignon jaune AB - Irrigation." Rapport SERAIL.

Heredia, M. (2007). "Etude technico-économique sur les coûts énergétiques et hydrauliques de l'irrigation dans les exploitations agricoles des sols forestiers d'Aquitaine." Rapport GRCETA-SFA.

Huet, L., Granier, J., and Molle, B. (2011). "Caractérisation du couple eau-énergie de divers systèmes d'irrigation en France." Rapport IRSTEA.

Lopez, J. M., and Dejean, C. (2016). "Appui à la mise en place, au suivi et à l'analyse des résultats d'un dispositif expérimental d'irrigation en goutte à goutte enterré sur grande culture. Ferme expérimentale de la Mirandette. Résultats de la 4ème campagne agricole Maïs-2015." Contrat de prestation de services IRSTEA – CACG.

Lopez, J. M., and Dejean, C. (2018). "Appui à la mise en place, au suivi et à l'analyse des résultats d'un dispositif expérimental d'irrigation en goutte à goutte enterré sur grande culture. Ferme expérimentale de la Mirandette. Résultats de la 6ème campagne agricole Maïs-2017." Contrat de prestation de services IRSTEA – CACG.

Lopez, J. M., and Dejean, C. (2019). "Appui à la mise en place, au suivi et à l'analyse des résultats du dispositif expérimental d'irrigation en goutte à goutte enterré sur grandes cultures conduit sur la Ferme expérimentale de La Mirandette : Résultats de la campagne agricole Maïs-2018." Contrat de prestation de services IRSTEA – CACG.

Lopez, J. M., Dejean, C., and Bozza, J. L. (2015). "Appui à la mise en place, au suivi et à l'analyse des résultats d'un dispositif expérimental d'irrigation en goutte à goutte enterré sur grande culture. Ferme expérimentale de la Mirandette. Résultats de la 3ème campagne agricole Maïs-2014." Contrat de prestation de services IRSTEA – CACG.

MAAF (2014). "Consommation d'énergie, Enquête sur les consommations et les productions d'énergie dans les exploitations agricoles en 2011", SSP, Agreste Primeur n°311, 4 pages http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/primeur311.pdf

MAAPR (2005). Circulaire DPEI/SPM/SDCPV/4029, 26 Avril 2005. "Validation des forfaits 2005 applicables aux programmes opérationnels à partir de 2005". Ministère de l'agriculture, de l'alimentation, de la pêche et de la ruralité. https://www.google.fr/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKEwi-vLT9yL_mAhUZiFwKHd-QB8MQFjAAegQIARAC&url=https%3A%2F%2Finfo.agriculture.gouv.fr%2Fgedei%2Fsite%2Fbo-agri%2Finstruction-C2005-4029%2Ftelechargement&usg=AOvVaw2Ia_ogt2LZS9qs7yyuJ2dR

MAP (2007). Circulaire DPEI/SDCPV/C2007-4033, 30 Avril 2007. "Validation des forfaits 2006 applicables aux programmes opérationnels à partir de 2006. Ministère de l'agriculture et de la pêche". https://agriculture.gouv.fr/sites/minagri/files/documents//dgpeic20074033z.pdf

MEEM (2016). "Bilan énergétique de la France pour 2015", Service de la Statistique et de la Prospective, Datalab, 151 pages

http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/publications/p/2587/1080/bilan-energetique-france-2015.html

Pagliarino, V., Deumier, J. M., Espagnol, G., Lacroix, B., Marsac, S., and Berrodier, M. (2012). "L'irrigation par goutte-à-goutte des grandes cultures en France : pratiques, axes de recherche et perspectives." Rapport Arvalis. 35 p.

Serra-Wittling, C., and Molle, B. (2017). "Evaluation des économies d'eau à la parcelle réalisables par la modernisation des systèmes d'irrigation. Rapport d'étude réalisée avec le soutien du Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation." Rapport IRSTEA.

Siri, F., and Boyer, I. (2006). "Essai mini-aspersion mécanisee sur carotte 2006." Rapport Ardepi, Aprel, CETA de Saint-Anne.