Pilotage de l'irrigation en cultures légumières : enquêtes sur les outils et les pratiques

Sophie Ricard (chargée de mission, ARDEPI)
François Lecompte(chargé de recherches, INRA)

Octobre 2015

Avec la collaboration du comité de pilotage composé de : C.Raynal (CTIFL), I.Boyer (ARDEPI), B.Jeannequin (INRA Alénya), M.Legrand (Unilet), C.Goillon (Aprel), B.Laroche (ARDEPI), G.Roche (Légumes de France).

Avec la participation de : P.Guinet (Agroressource), H.Ernout (CETA des serristes), T.Dansette (Chambre d'agriculture Rhône), M.Chaix (CETA Eyguières), D.Izard (Chambre d'agriculture du Vaucluse), X.Dubreucq (conseiller indépendant), R.Giovinazzo (SONITO), L.Schoen (SICA Centrex), I.Berthoumieu (Agralis), H.Henry (Arc-en-ciel), L.Espagnacq (Chambre d'agriculture Haute Garonne), C.Delamarre (Chambre d'agriculture Lot et Garonne), F.Siri (Uniproledi), J.Campguilhem (GR CETA), P.Lom (Savéol), S.Bochu (Chambre d'agriculture Tarn et Garonne), A.Bardet (CTIFL Lanxade), H.Clerc (Invenio), D.Lavigne (CEFEL Montauban), O.Favaron (Invenio), T.Falip (NaanDaanJain), T.Massias (Chambre d'agriculture Charente Maritime), L.Giardino (Chambre d'agriculture Vendée), A.Cottais (Chambre d'agriculture Bretagne), N.Mezencev (Chambre d'agriculture Finistère), M.Le Lan (SEHBS), M.Davy (Sileban), L.Fouyer (CTIFL Carquefou), A.Rey et K.Poter (Gab et Cab 44), X.Eftimakis (Challenge agriculture), G.Capelle (Bonduelle), J.Blarel (Chambre d'agriculture Nord-Pas-de-Calais), D.Lebossé (UOPLI).

Informations et contact :

François Lecompte (INRA)

Domaine St Paul Site Agroparc
CS 40 509 - 84914 Avignon Cedex 9
+33 (0)4 32 72 26 74
francois.lecompte@avignon.inra.fr,

Table des matières

Remerciements 4

Introduction 5

1. Rappels bibliographiques sur le matériel de pilotage et les enjeux d'une maîtrise de l'irrigation . 5

1) Méthodes et matériel pour le pilotage de l'irrigation 7

a) Mesure de l'état hydrique du sol 7

b) Mesure de l'état hydrique des plantes 10

c) Situation et perspectives de développement du matériel de pilotage 11

2) Enjeux agronomiques liés à l'irrigation 12

a) Niveaux d'irrigations et besoins des plantes 12

b) Rendement et qualité 13

c) Irrigation et maladies 13

d) Lessivage 14

2. Objectifs détaillés et méthodologie de l'étude 15

3. Résultats des enquêtes 18

1) Description de l'échantillon de l'enquête quantitative auprès des producteurs et précautions d'interprétation 18

3) Déterminants de l'équipement en matériel de pilotage 20

4) Matériel utilisé 26

5) Freins à l'équipement en matériel de pilotage 28

6) Evolution des outils de pilotage 30

7) Besoins de formation des utilisateurs 34

Discussion et recommandations 36

1) Développer la diffusion des outils de pilotage dans les différentes filières 36

2) Développer des outils adaptés aux besoins 37

Remerciements

Les auteurs remercient le GIS PIClég pour le financement de l'étude, l'ARDEPI pour avoir rendu possible sa réalisation, l'INRA pour la mise à disposition de ses ressources logistiques, les membres du comité de pilotage pour leur encadrement. Un remerciement particulier est adressé à I.Boyer (Ardepi) et C.Goillon (APREL) pour leur implication tout au long de l'étude. Les auteurs remercient également Anne Terrentroy (CA 13), François Villeneuve (CTIFL) et Vincent Faloya (INRA) pour leur relecture du rapport.

Les auteurs remercient particulièrement tous les acteurs des filières de production qui ont pris le temps de fournir les informations rassemblées dans cette étude.

Introduction

L'irrigation est une technique agricole consistant à apporter dans une parcelle une certaine quantité d'eau, afin de compléter l'offre du sol, insuffisante au regard de la demande des cultures. Les besoins en irrigation dépendent de nombreux facteurs, liés au sol, au climat, et aux plantes cultivées. En France, plusieurs espèces légumières sont irriguées, pendant la totalité ou une partie de leur cycle. L'irrigation est obligatoire en culture sous abri, puisque l'eau de pluie n'atteint pas les surfaces de sol couvertes, mais elle est également pratiquée en plein champ pour un certain nombre d'espèces, comme la carotte, le haricot vert, ou la tomate. Les quantités d'eau apportées doivent être raisonnées. Des irrigations trop peu fréquentes ou des quantités d'eau insuffisantes pourront pénaliser la croissance et les composantes du rendement du peuplement cultivé ; à l'inverse des irrigations excessives pourront fragiliser le système racinaire tout en favorisant la migration de l'eau et des solutés vers les couches profondes du sol ainsi que les risques de rejet de gaz à effet de serre (N_2O notamment). Par ailleurs, des variations d'alimentation en eau à la hausse ou à la baisse peuvent être provoquées pour favoriser des objectifs de qualité des produits récoltés. Pour s'assurer du bien-fondé d'une irrigation, la quantité d'eau à apporter peut être basée sur la mesure de la demande climatique de la culture, dérivée de l'évapotranspiration potentielle, ou sur la mesure de l'état hydrique du sol et ou des plantes. A partir de ces mesures, obtenues à l'aide de capteurs spécifiques, des règles de décision adaptées permettent d'optimiser les apports ; c'est le principe du pilotage de l'irrigation. Les premiers capteurs et outils de pilotage ont été développés il y a plusieurs décennies. Les techniques sont depuis en constante évolution, et de nombreuses solutions pratiques sont disponibles commercialement. Cependant l'usage de ces outils de pilotage dans les différentes cultures légumières est mal connu, faute d'études destinées à évaluer les équipements et leurs utilisations. L'objet de cette étude est par conséquent d'apporter des informations sur la nature et l'usage des outils de pilotage de l'irrigation en cultures légumières, recueillies auprès de différents acteurs des filières de production légumière.

Après un bref rappel bibliographique sur les différentes méthodes permettant le pilotage de l'irrigation et les enjeux liés à une bonne maîtrise de l'eau dans les différentes cultures, ce document synthétise les principaux renseignements permettant de dresser un constat sur les pratiques de pilotage de l'irrigation, et donne quelques éléments de prospective ainsi que des recommandations pour développer l'usage d'outils de pilotage dans les filières de production légumière. Par outils de pilotage, nous entendons dans le cadre de ce rapport les capteurs posés dans les parcelles soit dans le sol soit sur les plantes.

1. Rappels bibliographiques sur le matériel de pilotage et les enjeux d'une maîtrise de l'irrigation

Le moteur de la circulation de l'eau dans le système sol-plante est la différence entre le potentiel hydrique de la plante (Ψ_{plante}) et le potentiel hydrique du sol (Ψ_{sol}). L'eau se déplace de l'endroit où elle est le plus disponible vers l'endroit où elle l'est le moins, dans le sens des potentiels hydriques décroissants (Castell, 2006). Quand la plante transpire, le potentiel hydrique de la feuille diminue ce qui créée déséquilibre de potentiel permettant à l'eau contenue dans le xylème d'être

attirée jusqu'aux feuilles. Le même mécanisme se produit en « chaîne » : $\Psi_{xylème}$ diminue, puis Ψ_{racine} diminue permettant finalement à l'eau du sol de pénétrer dans les racines (Castell, 2006). Le potentiel hydrique du sol est déterminé par des forces gravitaires, matricielles (qui dépendent de la texture du sol) et dans une moindre mesure osmotiques (qui dépendent de la salinité du sol). La texture du sol influence la teneur en eau du sol (θ) et son potentiel hydrique (Ψ), et en conséquence la courbe de rétention en eau du sol, qui relie ces deux grandeurs. Cela est illustré sur la figure 1, qui représente la courbe de rétention d'un sol argileux et d'un sol sableux : pour une même teneur en eau le potentiel hydrique est plus faible pour un sol argileux que pour un sol sableux. En effet, dans un sol argileux la taille des particules est de l'ordre du micromètre alors que dans un sol sableux elle est de l'ordre du dixième de millimètre : les forces matricielles sont donc plus importantes dans un sol argileux ce qui engendre un potentiel hydrique plus faible. De même, à potentiel hydrique égal, la teneur en eau est plus élevée dans un sol argileux que dans un sol sableux. La quantité d'eau disponible pour les plantes (la réserve utile du sol) correspond à la différence entre la teneur en eau à la capacité au champ et la teneur en eau au point de flétrissement permanent. Les sols sableux ont une faible réserve utile et les sols argileux ont une réserve plus importante, c'est pourquoi la gestion de l'irrigation est différente en fonction du type de sol : le potentiel hydrique du sol aura tendance à diminuer rapidement dans les sols sableux, rendant plus difficile l'extraction d'eau par les plantes. Il conviendra de recharger le sol en eau plus fréquemment dans ce type de sol. Pour le pilotage de l'irrigation il existe des appareils de mesure permettant d'obtenir soit la teneur en eau du sol soit le potentiel hydrique et nous présenterons les deux types d'appareil. De plus, nous présenterons aussi les capteurs utilisés pour mesurer l'état hydrique des plantes.

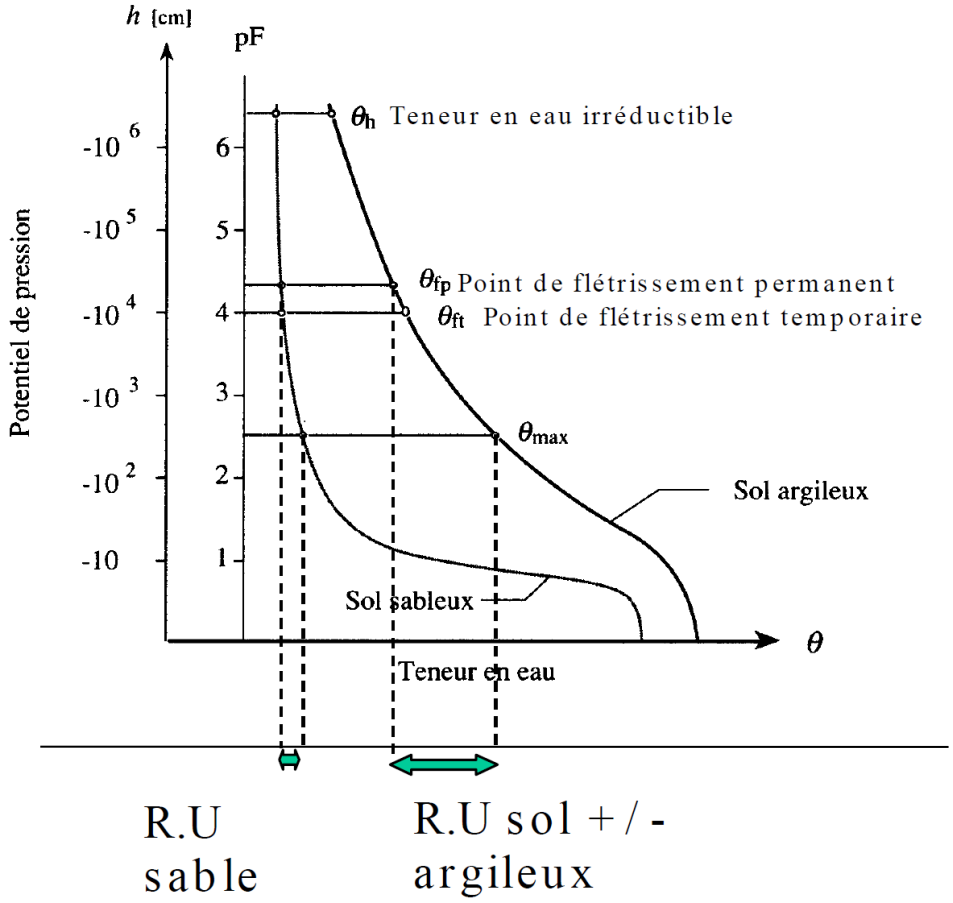

Figure 1 : Effet de la texture du sol sur la teneur en eau du sol et la potentiel hydrique

1) Méthodes et matériel pour le pilotage de l'irrigation

a) Mesure de l'état hydrique du sol

i. Mesure du potentiel hydrique par des sondes tensiométriques

Le potentiel hydrique du sol indique la force qui doit être développée par les racines pour extraire l'eau du sol: c'est une mesure robuste de la disponibilité en eau pour les plantes. L'irrigation peut être déclenchée lorsque le potentiel hydrique du sol atteint une certaine valeur, souvent dépendante du type de culture (Hanson et al., 2000a). Des valeurs de références sont présentées dans différents ouvrages, mais peuvent aussi être acquises de manière empirique.

Tensiomètre à eau

Le principe du tensiomètre à eau est de mesurer directement le potentiel hydrique du sol (Zazueta and Xin, 1994). Le dispositif comporte un tube relié à une extrémité par une bougie poreuse en contact avec le sol et bouché à l'autre extrémité. Le tube est rempli d'eau; l'eau du réservoir en s'équilibrant avec la solution du sol provoque une dépression dans le tube, qui peut être mesurée à l'aide d'un manomètre, une colonne de mercure ou un capteur de pression relié à une centrale d'acquisition (Dukes et al., 2010; Shock and Wang, 2011). Cette dépression est directement reliée au potentiel hydrique du sol.

Les avantages de ce système sont qu'il n'est pas nécessaire d'avoir une source d'énergie pour réaliser la mesure manuellement (Shock and Wang, 2011), que le système est peu cher, et que l'installation est facile. Un des inconvénients est qu'il faut s'assurer qu'il y ait en permanence de l'eau dans le dispositif pour que l'équilibre puisse se faire, et donc vérifier de manière régulière l'état du dispositif. Par ailleurs les tensiomètres ne permettent pas de mesurer des potentiels inférieurs à -100 kPa environ.

Capteurs à matrice granulaire/ Watermark®

Le principe de cet appareil est de mesurer la résistivité électrique au sein d'une matrice poreuse grâce à deux électrodes. L'appareil est enterré dans le sol et l'eau du sol entre en équilibre avec la solution de la matrice. A partir d'une mesure de la résistivité électrique au sein d'une matrice poreuse, il est possible de déterminer le potentiel hydrique du sol grâce à une courbe de rétention en eau de cette matrice (Intrigliolo and Castel, 2004).

Les avantages de ce système sont que le coût d'utilisation et de maintenance est faible et qu'il est adaptable à différents types de sol. Cependant un calibrage est nécessaire pour chaque type de sol (Hanson, Peters et al. 2000). D'autre part les capteurs à matrice granulaire présentent un phénomène d'hystérèse (McCann, Kincaid et al. 1992), avec pour conséquence un possible retard dans la mesure des variations de potentiel. Ainsi ce type de sondes ne répond pas très bien à des changements rapides de la quantité d'eau disponible du sol, si ceux-ci doivent être mesurés (Intrigliolo and Castel 2004). Cela ne remet pas en cause cependant l'utilisation de ces capteurs dans une large gamme de situations d'irrigation (Hanson et al., 2000b; Intrigliolo and Castel, 2004; McCann et al., 1992). .

Bloc de gypse

Le principe de cet appareil, proche des capteurs à matrice granulaire, est de mesurer la conductivité électrique au sein d'un bloc de gypse. La mesure de conductivité est reliée au potentiel hydrique du sol (Ψ) par des courbes de référence liant les deux variables (Zazueta and Xin, 1994). Le dispositif se compose de deux électrodes qui sont placées dans une solution saturée en sulfate de calcium (qui joue le rôle d'électrolyte) : le bloc de gypse absorbe l'eau du sol et la conductivité est mesurée (Dobriyal et al., 2012; Zazueta and Xin, 1994).

Les inconvénients de ce dispositif est qu'il est peu sensible aux changements de potentiel hydrique du sol comparé aux tensiomètres par exemple (Hanson, Orloff et al. 2000), et qu'il doit être calibré pour chaque type de sol. Une des autres limites est que le bloc de gypse se dégrade au fil du temps (Evett 2008).

ii. Mesure de la teneur en eau du sol

Méthode directe

Il est possible de déterminer directement l'eau contenue dans le sol par une mesure gravimétrique correspondant à la différence de poids d'un échantillon de sol frais et sec après séchage à 105°C pendant 24h (Bittelli, 2011; Dobriyal et al., 2012; Schmugge et al., 1980).

On peut alors déduire la fraction d'eau (*w*) contenue dans l'échantillon de sol : $w = \frac{m_l}{m_s}$ (ou m_l est la masse d'eau et m_s est la masse de sol sec). En connaissant la densité du sol (ρ_b) on peut connaître le volume qu'occupe l'eau dans l'échantillon de sol : $\theta = w * \frac{\rho_b}{\rho_l}$, où ρ_l est la masse volumique de l'eau (égale à 1). Cette méthode est extrêmement simple mais elle nécessite des prélèvements destructifs. Dans la pratique cette méthode n'est pas utilisée pour piloter l'irrigation en cultures légumières du fait des efforts qu'elle requiert et du laps de temps nécessaire pour obtenir les données (Muñoz-Carpena and Dukes, 2014).

Sondes capacitives

Le but est de mesurer la permittivité diélectrique du sol mesurée grâce à un champ magnétique à une fréquence connue (Dobriyal et al., 2012; Gaudu et al., 1993). La variable que l'on veut renseigner *in fine* est le volume d'eau contenu dans le sol que l'appareil calcule en utilisant une courbe caractéristique reliant la permittivité diélectrique mesurée et la teneur en eau du sol. La permittivité diélectrique relative de l'eau étant largement supérieure à celle des autres constituants du sol (phase solide et gazeuse), cette mesure traduit convenablement les variations de teneur en eau. Mais la mesure est dépendante de nombreux facteurs, comme la structure, la texture, la salinité, ou la température du sol (Gaudu et al., 1993). Un étalonnage est donc nécessaire pour utiliser ces capteurs.

Un des avantages de ce système est sa facilité de mise en œuvre, sa mobilité, et la capacité de réaliser des mesures en continu à partir d'appareils sans fils (Zazueta and Xin, 1994).

Humidimètre TDR (time domain reflectometry)

Comme pour les sondes capacitives, la méthode TDR est basée sur la mesure de la permittivité, liée à la constante diélectrique de l'eau. Le principe de l'appareil est cependant différent : il mesure la vitesse à laquelle se propage une onde électromagnétique dans le sol, laquelle est modifiée avec l'eau contenue dans le sol (Dobriyal et al., 2012). On peut connaître la constante diélectrique grâce à la relation : $\varepsilon = (c/v)^2$, où c est la vitesse de l'onde électromagnétique dans le vide, et v la vitesse de l'onde électromagnétique dans le sol et ε la permittivité relative. Plus il y a d'eau dans le sol, plus v est petit, et plus la permittivité est grande.

Les avantages de cette méthode sont que les résultats sont indépendants de la texture du sol et de sa température (Zazueta and Xin, 1994). Un des principaux inconvénients est que l'appareillage est coûteux, et que pour des sols riches en argile il est plus difficile de lier K et θ.

Humidimètre à neutrons

Le principe de cette méthode est de mesurer la vitesse d'atténuation d'un rayonnement émis, comme des neutrons générés à partir d'une source radioactive. Ceux-ci sont lancés à grande vitesse par une source, et sont ensuite ralentis lorsqu'ils rencontrent les atomes d'hydrogène contenus dans les molécules d'eau (Evett and Steiner, 1995). Une courbe d'étalonnage donne la relation entre le nombre d'électrons ralentis et la teneur en eau.

Les avantages de cette méthode sont que la mesure peut être automatisée et qu'il est possible d'obtenir un profil de l'eau dans le sol en mesurant l'eau contenue dans un volume de sol important. L'inconvénient principal est que les mesures doivent être réalisées par un opérateur spécialisé du fait de la radioactivité de la source (Dobriyal et al., 2012; Zazueta and Xin, 1994). Cette méthode, utile pour des travaux de recherche, n'est pas destinée au pilotage de l'irrigation. La précision de l'estimation de teneur en eau est cependant meilleure qu'avec les sondes capacitives (Evett and Steiner, 1995).

Atténuation des ondes gamma

Le principe de cette méthode est de mesurer la vitesse à laquelle se propagent les ondes gamma dans le sol. Cette méthode radioactive est basée sur l'hypothèse que la diffusion et l'absorption des ondes gamma sont corrélées avec la densité de la matière qu'elles traversent. Le paramètre mesuré est le volume d'eau contenu dans le sol (Zazueta and Xin, 1994).

Les avantages de cette méthode sont que la mesure peut être automatisée, et que l'on peut mesurer l'eau contenue dans le sol à une profondeur importante. Cependant, c'est une méthode couteuse et difficile à utiliser (du fait de la source radioactive), et sensible aux variations de densité du sol (Zazueta and Xin, 1994).

Radar sous-terrain

Le principe est de mesurer les variations d'ondes radio (générées par une antenne radar) grâce à une récepteur qui détecte les variations dans les propriétés électriques des ondes en détectant une part du signal qui est réfléchit (Chanzy et al., 1996). C'est une méthode rapide, non-destructrice et avec une haute résolution.

b) Mesure de l'état hydrique des plantes

Le potentiel hydrique du sol, relié à sa teneur en eau, est un des moteurs de la circulation de l'eau dans la plante. Cependant il est aussi possible d'estimer les variations de conduction ou de contenu en eau des plantes en se basant sur des mesures micromorphométriques d'épaisseur de la feuille ou du diamètre de la tige ou des fruits. Il est également possible de mesurer directement les flux dans la sève, ou d'estimer le potentiel hydrique des feuilles à partir d'une chambre à pression (Jones, 2004). La liste des méthodes d'estimation du statut hydrique des plantes donnée ici n'est pas exhaustive. Hors celles basées sur capteurs micromorphométriques, peu d'entre elles ont donné lieu à des développements commerciaux.

Epaisseur de la feuille

Lorsque la plante manque d'eau, la feuille devient plus fine du fait de la diminution de la pression de turgescence (Jones 2004). Il est alors possible grâce à un capteur (de type capteur de positions linéaires) de connaître les variations de l'épaisseur de la feuille. Il n'y a pas d'exemple commercial de telles mesures pour le pilotage de l'irrigation en maraîchage.

Diamètre de la tige

Les variations journalières du diamètre de la tige reflètent l'état hydrique de la plante car il y a des échanges d'eau entre les faisceaux du xylème (sève brute) et les cellules du parenchyme. Les variations du diamètre des tiges ont été bien étudiées pour les plantes ligneuses (Génard et al., 2001; Goldhamer and Fereres, 2001). Le diamètre de la tige est lié à la pression osmotique du xylème: plus le potentiel hydrique est négatif, et donc moins il y a d'eau, plus le diamètre de la tige diminue (Génard et al., 2001). Cependant il y a un phénomène d'hystérèse et lorsque le potentiel osmotique du xylème varie il n'y a pas de variation immédiate du diamètre de la tige : cela est imputable aux propriétés physiques des tissus que l'eau traverse pour passer du xylème au parenchyme.

Quelques études ont porté sur la mesure de la variation du diamètre des tiges pour des plantes herbacées, la tomate (De Swaef and Steppe, 2010; Gallardo et al., 2006b) et l'aubergine (Schoch et al., 1989). Pour ce qui est de l'aubergine les auteurs soulignent la relation entre le manque d'eau et les variations du diamètre des tiges, sans pour autant parler de l'application pour le pilotage de l'irrigation. Pour ce qui est de la tomate, l'expérience de Gallardo *et al.* (2006a) montre que la variation du diamètre de la tige est influencée par l'âge de la plante. En effet lorsque la plante est jeune la tige grandit et s'élargit de manière importante et les variations du diamètre de la tige ou cours de la journée sont plus faibles que pour une plante adulte. Ceci est d'ailleurs également reporté dans des études similaires faites sur des plantes ligneuses (Goldhamer and Fereres, 2001; Intrigliolo and Castel, 2004). Ainsi, utiliser des mesures de diamètre de tige pour le pilotage de l'irrigation suppose de tenir compte du stade de la plante.

Flux de sève

Le but est de mesurer le flux de sève au sein du xylème (sève brute) qui renseigne sur le statut hydrique de la plante : plus la plante transpire, plus le potentiel osmotique est négatif au sein du xylème (De Swaef and Steppe, 2010). Une des façons de mesurer le flux de sève est d'appliquer un flux de chaleur sur la tige et de mesurer l'écart de température avant et après l'application de ce flux de chaleur (Ehret et al., 2001). Une autre technique, toujours en se basant sur un flux de chaleur,

consiste à mesurer le temps nécessaire au flux de chaleur pour parcourir la distance entre deux capteurs posés sur la tige (Ehret et al., 2001). Cependant il est à noter que les changements dans le flux de transpiration de la plante sont déterminés par les changements d'ouverture et de fermeture des stomates qui sont eux-mêmes influencés par d'autres facteurs comme le taux d'humidité. Les changements dans le flux de sève peuvent donc avoir lieux sans qu'il y ait de changements dans l'ouverture des stomates, et donc modification du statut hydrique de la plante (De Swaef and Steppe, 2010; Jones, 2004). Cette technique a été utilisée pour décrire la dynamique de l'état hydrique des plantes en serre (Ehret, Lau et al. 2001), sans pour autant utiliser ces données pour le pilotage de l'irrigation.

c) Situation et perspectives de développement du matériel de pilotage

Il a été montré dans les paragraphes précédents qu'en matière de capteurs de l'état hydrique des sols et des plantes, une large gamme de technologies est disponible pour une utilisation en production agricole (Romero et al., 2012). Les capteurs de potentiel hydrique les plus développés sont les tensiomètres et les capteurs à matrice granulaire (Watermark®). Les mesures de teneur en eau du sol sont quant à elles réalisées la plupart du temps grâce à des sondes capacitives et parfois des humidimètres TDR.

Le pilotage de l'état hydrique des plantes est difficile à mettre en œuvre dans le cas des plantes maraîchères. D'une part, pour de nombreuses espèces, les plantes restent en place relativement peu de temps sur les parcelles (en comparaison de cultures annuelles à cycle long ou de cultures pérennes) ce qui implique une maintenance élevée. D'autre part, les analyses micro-morphométriques telles que l'évolution du diamètre de la tige n'ont pas abouti au développement de véritables outils de pilotage pour l'irrigation. Le pilotage de l'état hydrique du sol est plus facile à mettre en œuvre au champ car d'une part des technologies sont largement disponibles, et d'autre part l'interprétation des données mesurées est relativement simple.

A ce jour, les innovations pour le pilotage de l'irrigation proviendraient de deux domaines : d'une part concernant l'acquisition des données, et d'autre concernant le transfert, l'intégration et la restitution des données. L'acquisition des données peut se réaliser de différentes manières : soit de manière ponctuelle, dans ce cas-là l'opérateur se rend au champ et collecte les données (directement sur le capteur ou via un lecteur), soit en continu lorsqu'un enregistreur est placé au champ. Dans ce dernier cas, l'avantage est que l'opérateur n'est pas contraint de se rendre au champ et peut disposer des données directement sous forme numérique via une interface. Parfois le boitier de mesure est directement intégré à la sonde. Concernant le traitement des données, plusieurs étapes sont nécessaires : tout d'abord le transfert des données, l'intégration des données, et la restitution des données. Le transfert peut se faire grâce à des fils, en déplaçant le boîtier de mesures jusqu'au poste de travail, ou bien par des ondes. Dans ce cas-là le boîtier d'acquisition de données reste au champ et via des ondes GPRS par exemple l'opérateur reçoit directement par sms ou mail les mesures réalisées par les capteurs. Cette méthode présente les avantages de libérer l'opérateur de la contrainte liée aux déplacements sur les parcelles pour collecter les données, et de permettre une compilation automatique des données. Ces méthodes existent déjà mais pourraient peut-être être développées plus largement.

La restitution des données se fait généralement sous forme graphique pour montrer l'évolution de la variable mesurée au cours du temps. Connaissant les seuils en dessous desquels la

plante n'est plus dans une zone de « confort hydrique », l'opérateur peut alors réajuster son irrigation. Dans ce domaine-là certaines sociétés proposent un service en ligne sur lequel il est possible d'une part de visualiser l'évolution de l'état hydrique du sol et d'avoir un conseil personnalisé à la parcelle pour la gestion de l'irrigation. Dans le futur, les professionnels envisagent le développement des systèmes en « boucle fermée » c'est-à-dire de piloter automatiquement l'irrigation en reliant le système d'irrigation à un logiciel intégrant les données sur l'état hydrique du sol et ayant une règle de décision intégrée (par exemple, déclenchement de l'irrigation lorsque $\Psi <$ 30cbars jusqu'à ce que Ψ = 10cbars). Cependant une des limites de cette approche est la représentativité des mesures dans des parcelles ou des groupes de parcelles hétérogènes, et les risques associés à des dysfonctionnements de capteurs.

2) Enjeux agronomiques liés à l'irrigation

L'irrigation a un impact sur de nombreux résultats agronomiques et sur l'environnement. Nous illustrons dans les paragraphes ci-dessous ces impacts, à partir de quelques exemples issus de la littérature scientifique

a) Niveaux d'irrigations et besoins des plantes

On peut piloter l'irrigation dans l'objectif de maintenir différentes gammes de statut hydrique des plantes. Dans beaucoup de situations agricoles, la quantité d'eau apportée est supérieure ou égale à l'évapotranspiration des plantes. L'irrigation est optimale du point de vue de la croissance végétative quand les apports correspondent à l'évapotranspiration. On peut parler de « confort hydrique » à partir d'une quantité apportée supérieure à l'évapotranspiration. Cependant, au-delà de la quantité correspondant à l'évapotranspiration maximale, l'efficience de l'eau diminue, puisque les quantités d'eau excédentaires ne favorisent ni augmentation de croissance, ni augmentation de rendement. D'autre part, l'eau en excès augmente le risque de lessivage des éléments minéraux et d'asphyxie racinaire. A l'inverse, une irrigation sera appelée déficitaire lorsque les apports d'eau ne compensent pas l'évapotranspiration. Cette pratique peut être intentionnelle, y compris dans le cas d'une irrigation pilotée, dans des zones agricoles où la disponibilité en eau est restreinte. En effet, d'une part, la quantité d'eau nécessaire pour maximiser la croissance végétative n'est pas nécessairement égale à la quantité d'eau nécessaire pour maximiser le rendement. Ainsi on peut obtenir un rendement maximum avec une quantité d'eau inférieure à l'évapotranspiration maximale. D'autre part, l'efficience d'utilisation de l'eau (en anglais water use efficiency, couramment abrégée par WUE) pour le rendement, c'est-à-dire la pente de la relation entre quantité d'eau apportée et rendement obtenu, n'est pas constante et à tendance à diminuer à mesure que l'on s'approche de l'optimum (le point à partir duquel un apport d'eau supplémentaire ne provoque plus de gain de rendement) (Fereres and Auxiliadora Soriano, 2007). De nombreux travaux montrent les avantages et limites de l'irrigation déficitaire en cultures légumières (Costa et al., 2007; Fabeiro et al., 2002b; Kirda et al., 2004; Sharma et al., 2014; Wang et al., 2010). Une des méthodes d'irrigation déficitaire consiste à irriguer successivement une partie ou l'autre des systèmes racinaires: ainsi lors d'une première irrigation une première partie des racines reçoit de l'eau, et lors d'une deuxième irrigation c'est l'autre partie qui est irriguée (Sadras, 2008; Sepaskhah and Ahmadi, 2010). Une méta-

analyse de travaux sur l'irrigation déficitaire portant sur un ensemble d'espèces annuelles et pérennes montre un WUE en irrigation déficitaire autour de 1.8 fois celui obtenu avec une irrigation sans restriction (Sadras, 2008). Dans cette analyse, il est également montré que le WUE est seulement marginalement supérieur dans les cas où l'irrigation déficitaire est appliquée avec une technique alternant les zones humidifiées.

b) Rendement et qualité

Tomate

Le mode d'irrigation et la fréquence des apports d'eau peuvent influencer à la fois l'efficience de l'eau et le rendement en fruit (Camp, 1998; Zotarelli et al., 2009b). Une irrigation déficitaire modérée peut ne pas provoquer d'effet marqué sur le rendement d'une production de tomate pour le marché du frais (Kirda et al., 2004), mais l'intérêt de stratégies diminuant les apports d'eau dépend de la rareté de la ressource hydrique. Dans beaucoup de situations de production, l'usage de capteurs de l'état hydrique du sol ou une mesure de l'évapotranspiration maximale permet d'optimiser l'irrigation afin d'obtenir un rendement maximal avec une bonne efficience de l'eau (Lecompte, 2012; Thompson et al., 2007; Zotarelli et al., 2009b)

En tomate d'industrie, où une teneur en matière sèche élevée est recherchée, des stratégies de limitation des apports d'eau peuvent être justifiées (Mitchell et al., 1991; Zegbe et al., 2004).

Melon

Des essais ont été réalisés dans le but de connaître les effets d'une restriction d'eau à différents stades. Le rendement en fruit est d'autant plus affecté que le déficit d'irrigation est appliqué précocement, en particulier pendant la floraison (Fabeiro et al., 2002a). Une restriction d'eau en phase de maturation des fruits affecte moins le rendement en volume, et peut avoir un effet positif sur la qualité des fruits, en augmentant leur teneur en sucre (Fabeiro et al., 2002a; Sharma et al., 2014). En conséquence, il est conseillé en production de veiller à une bonne maîtrise des irrigations en phase de floraison, et de diminuer les apports d'eau à l'approche de la récolte.

c) Irrigation et maladies

Les études scientifiques montrant des relations entre mode et quantité d'irrigation et pression phytosanitaire sont nombreuses. Quelques exemples sont donnés ici pour des cultures légumières.

Carotte

Le lien entre l'état hydrique du sol et l'incidence de maladies est assez bien documenté sur carotte. Des périodes prolongées de saturation en eau du sol, en conséquence de fortes pluies ou d'une irrigation excessive, sont favorables au développement de symptômes de cavity spot causés par certaines espèces de Pythium (Hiltunen and White, 2002). De même, des potentiels matriciels inférieurs à -20kPa, traduisant des situations proches de la saturation en eau, sont favorables au développement de sclerotinioses (Kora et al., 2005). La saturation en eau du sol peut également

favoriser le développement de bactéries de l'espèce *Erwinia chrysanthemi (Farrar et al., 2000)*. La durée de la période de saturation en eau, et la température du sol durant cette période sont corrélées positivement à l'intensité des symptômes observés. A l'approche de la maturité, les carottes se montrent particulièrement sensibles aux excès d'eau : cela se traduit par le phénomène appelé "tache d'eau" qui se présente sous forme d'une gerçure souvent porte d'entrée de nombreux pathogènes secondaires. Il ressort de ces études qu'en culture irriguée un raisonnement des apports d'eau, visant à limiter les périodes de saturation en eau du sol en ajustant les quantités et la fréquence des apports, contribue à limiter les risques sanitaires.

Laitue

Pour un nombre important d'espèces légumières, comme la laitue par exemple, le mode d'irrigation à une influence sur le développement de champignons phytopathogènes. Un grand nombre de champignons dispersés par des spores ont besoin d'un milieu liquide, favorisant la dispersion ou la germination de ces spores. L'irrigation par aspersion, qui mouille le feuillage, crée ainsi des conditions plus favorables à l'infection des feuilles, par rapport à un mode d'irrigation comme le goutte à goutte où l'eau est directement déposée au sol. Par ailleurs, l'humectation du couvert augmente l'humidité relative autour des plantes, ce qui constitue également un facteur favorable au développement de certains champignons. En production de laitue, il a été montré qu'une irrigation par aspersion était plus favorable au mildiou (Scherm and Bruggen, 1995) et à *Sclerotinia* spp (Wu and Subbarao, 2003, 2006) qu'une irrigation au goutte à goutte.

d) Lessivage

Plusieurs études sur cultures légumières montrent qu'une irrigation basée sur une mesure de l'état hydrique du sol permet de diminuer les apports en eau et de diminuer les pertes d'azote par lessivage (Muñoz-Carpena et al., 2005; Zotarelli et al., 2009a). Dans le cas de l'étude menée par Zotarelli *et al.* (2009) le pilotage de l'irrigation (avec lequel la fertilisation est couplée) permet de réduire d'environ sept fois la quantité de nitrates lessivée. La diminution du lessivage est due à la diminution de la quantité d'eau drainée, et éventuellement à la diminution de la quantité d'azote apportée lorsque celle-ci est proportionnelle à la quantité d'eau appliquée.

L'irrigation par aspersion ne permet pas une distribution totalement homogène de l'eau, même si des progrès importants ont été faits ces dernières années avec l'évolution du matériel. Une répartition non uniforme de l'eau sur la parcelle peut favoriser un lessivage des nitrates aux endroits où l'eau est apportée en excès. Cela a été montré sur des cultures de salade de plein champ (Bruckler et al., 1997) et d'abri (de Tourdonnet et al., 2001). D'autres résultats, pour une culture de carotte (Allaire-Leung et al., 2001), montrent que si la répartition de l'eau est supérieure à 80% on ne note pas de variabilité spatiale du lessivage des éléments mobiles. Ces résultats contradictoires peuvent s'expliquer par des différences de comportement hydrique des sols étudiés.

2. Objectifs détaillés et méthodologie de l'étude

Les objectifs de cette étude sont les suivants :

- Identifier les rôles des différents acteurs des filières dans le développement et l'utilisation d'outils de pilotage de l'irrigation.
- Etablir de manière quantitative le niveau d'équipement des exploitations et le type de matériel de pilotage utilisé.
- Comprendre les déterminants de l'équipement et l'utilisation des outils de pilotage.
- Envisager les évolutions techniques du matériel de pilotage.
- Formuler des recommandations pour développer la pratique du pilotage de l'irrigation.

Il a été choisi de cibler un certain nombre de filières de production représentatives des différentes cultures légumières irrigués, sans chercher à avoir une approche exhaustive des espèces cultivées :

- La tomate en sol est représentative des cultures d'été sous abris, en irrigation en goutte-à-goutte.
- Le melon est représentatif des cultures de printemps et d'été en plein champ et sous abris avec une irrigation en goutte-à-goutte. Pour cette culture on observe un lien fort entre l'irrigation et la qualité gustative des fruits.
- Les légumes en diversification : ce groupe représente des exploitations cultivant sur de petites superficies des espèces très variées (souvent variétés anciennes ou espèces oubliées), en vente directe et souvent en bio. Ce système de production se développe dans le sud-est de la France.
- La laitue est l'une des principales espèces cultivées de l'automne au printemps sous abris et du printemps à l'automne en plein champ et irriguée par aspersion.
- La carotte est une culture de plein champ ou d'abris irriguée par aspersion et dans une moindre mesure par irrigation localisée, avec autant pour le marché de frais que l'industrie.
- Le haricot vert représente les cultures industrielles contractualisées, cultivées en plein champ, et irriguées majoritairement par aspersion.

Des informations ont été recueillies par enquêtes, après élaboration de questionnaires. Deux types d'enquêtes ont été menées : une enquête qualitative à destination des acteurs des filières, pour l'essentiel en amont de la production. Cette enquête avait pour objectifs de déterminer le rôle des différents acteurs dans la diffusion de matériel de pilotage. Quatre groupes d'acteurs ont été enquêtés : fabricants de matériel d'irrigation et d'outils de pilotage, détaillants de matériel, conseillers agricoles et techniciens/ingénieurs de stations expérimentales. Un questionnaire a été adapté à chaque groupe, les interrogeant sur les outils de pilotage dans l'exercice de leur métier. Chaque questionnaire visait en outre à répondre à une question particulière. Le questionnaire à destination des fabricants de matériel visait à identifier les principaux axes de développement des entreprises en matière de pilotage de l'irrigation. Pour les détaillants, l'objectif était de comprendre les stratégies de vente de matériel de pilotage en fonction des filières cibles. L'enquête auprès des conseillers agricoles cherchait à percevoir l'importance du thème du pilotage de l'irrigation dans le conseil technique. Enfin les stations d'expérimentations ont été interrogées par rapport aux travaux menés sur l'irrigation et le pilotage. Le contenu précis de chaque questionnaire est donné en annexe ainsi que les effectifs des enquêtes. Au total 34 personnes ont été interrogées.

Une seconde enquête, traitée de manière quantitative, a été menée auprès d'agriculteurs des différentes filières de production étudiées, dans trois grandes régions de production de légumes irrigués : ouest, sud-ouest et sud-est. Cette enquête traitait de la structure des exploitations, du mode d'irrigation, des outils de pilotage et autres informations prises pour raisonner l'irrigation, ainsi que des motivations par rapport à la maîtrise de l'irrigation et son pilotage. Les exploitations ont été identifiées lors des enquêtes auprès des acteurs de la filière. Au total 81 enquêtes ont été menées, dans 57 exploitations agricoles. Plusieurs enquêtes ont pu être menées dans une même exploitation, certaines d'entre elles étant concernées par plusieurs filières de production. La plupart des exploitations produisait plusieurs espèces, mais c'est seulement dans le cas où ces espèces figuraient à part sensiblement égale dans l'activité de l'exploitation, avec des pratiques d'irrigation spécifiques à chacune d'entre elles, que les informations propres à chaque espèce ont été utilisées dans des enquêtes séparées.

Pour l'enquête qualitative auprès des acteurs des filières de production, les données ont été synthétisées de manière à obtenir des informations traduisant de manière représentative les déclarations des acteurs. Les spécificités propres à certains acteurs ont permis de nuancer les appréciations générales. Pour l'enquête auprès des exploitations agricoles, les réponses à chaque question pouvaient être quantitatives ou qualitatives. Toutes les réponses aux questions ont été codées et classifiées. Les variables quantitatives ont été soit traitées comme telles (surface, rendement des cultures, etc.), soit regroupées en classes avec un nombre d'individus le plus homogène possible par classe (par exemple le nombre d'années d'exercice de la profession ou la profondeur du sol). Les variables qualitatives pouvaient être soit binaires (oui/non, par exemple la possession de matériel de pilotage) soit composées de réponses multiples mais avec un nombre limité de possibilités (zone de production, type d'outils de pilotage, accès à l'eau…) permettant une répartition en classes. Une base de données à 51 descripteurs et 81 individus a été obtenue. Les données ont été traitées à l'aide de tableaux croisés avec le tableur Excel, ainsi que des tests du chi-2 et des analyses des correspondances multiples (ACM) avec le logiciel SAS. L'ACM est une méthode d'analyse factorielle adaptée à un tableau constitué d'individus décrits par des variables qualitatives, ce qui est le cas dans l'enquête menée auprès des producteurs. Elle a pour objet notamment de rassembler graphiquement ces variables autour d'axes qui synthétisent la plus grande partie possible de l'information contenue dans le tableau. On renvoie le lecteur à différentes ressources disponibles en ligne pour plus d'information. Autant que possible, les graphiques d'ACM ont été commentés dans le texte afin de faciliter leur interprétation. On retiendra que c'est la position relative des valeurs entre elles selon les axes synthétiques qui détermine leur association : plus les points sont proches, plus ils sont associés, c'est-à-dire qu'ils reviennent ensemble dans les réponses aux enquêtes.

Afin d'étudier les différents aspects de la problématique détaillée ci-dessus, les informations issues des deux enquêtes (filière et producteurs) ont été regroupées. Un certain nombre d'hypothèses et de questions préalables au recueil de d'information avaient été émises par les auteurs de l'étude. Ces hypothèses guident la présentation des résultats donnés après une description détaillée des exploitations enquêtées et des filières cibles. Certaines variables étudiées lors de l'enquête quantitative se sont avérées peu pertinentes vis-à-vis du déterminisme du pilotage de l'irrigation, ainsi toutes les variables renseignées dans le questionnaire ne sont-elles pas utilisées dans la présentation des résultats.

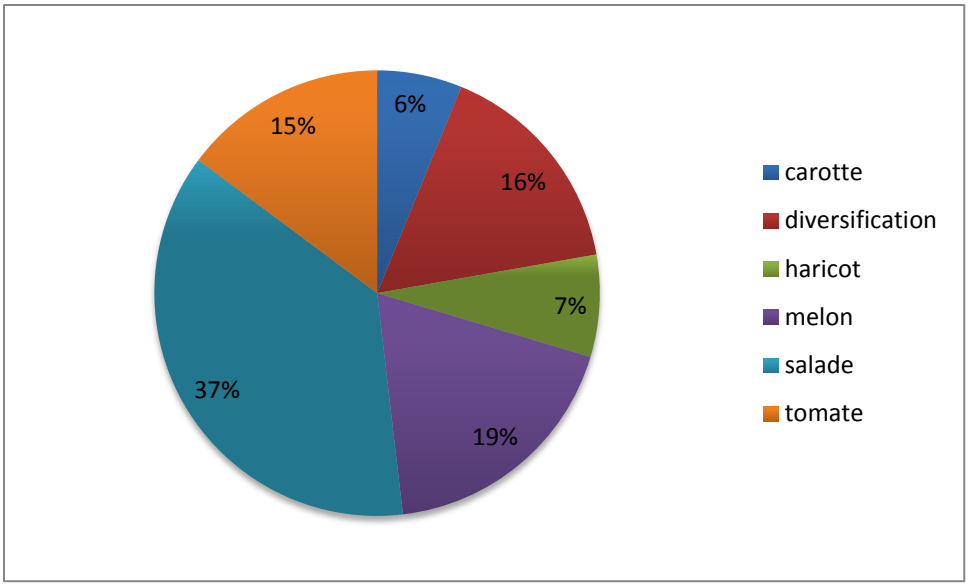

Figure 2 : Effectifs des enquêtes pour chaque espèce cible

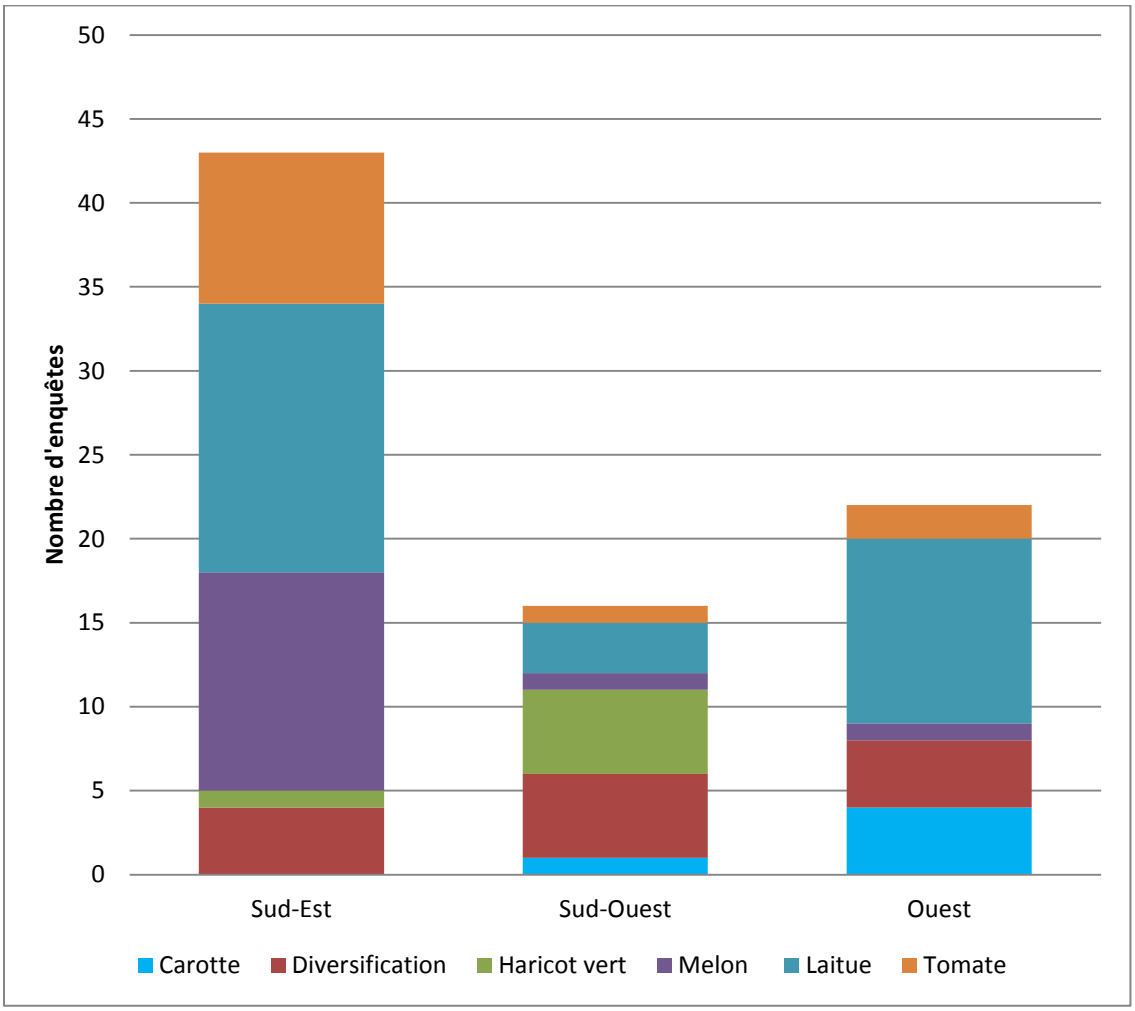

Figure 3 : Effectifs des enquêtes pour chaque grande région d'étude et chaque espèce

3. Résultats des enquêtes

1) Description de l'échantillon de l'enquête quantitative auprès des producteurs et précautions d'interprétation

Au sein des 81 échantillons de l'enquête producteurs, les effectifs par espèce sont inégalement répartis (figure 2). Les exploitations à dominante salade sont au nombre de 30 soit plus d'un tiers de l'échantillon. A l'opposé, certaines espèces sont représentées par des échantillons réduits, comme la carotte avec 5 enquêtes et le haricot vert avec 6 enquêtes. A cette irrégularité de répartition de l'échantillon entre espèces s'ajoute des différences de taille d'échantillon entre les 3 régions étudiées (figure 3). En effet, le sud-est est la zone où le plus d'enquêtes ont été réalisées, et elle concentre à elle seule plus de la moitié des enquêtes pour les producteurs de laitue, 86% des enquêtes en melon et 75% en tomate. **Cet échantillonnage n'est pas représentatif de la répartition des espèces sur le territoire français.** Les observations faites pour le melon ou la tomate seront surtout valables pour les modes de production du sud-est du territoire national. De même, le faible échantillon de producteurs de carotte n'est pas représentatif des grandes zones de production comme l'Aquitaine, où les techniques de culture peuvent être différentes de celles observées dans l'enquête. **Ce biais d'échantillonnage traduit pour partie la disponibilité des acteurs des différentes filières et régions pour répondre à l'enquête. Dans la suite du document, les différentes variables ont été traitées soit avec l'échantillon total, soit par espèce. Dans ce dernier cas, il conviendra d'être prudent sur la généralisation des informations obtenues dans le cas des filières avec un échantillon réduit.** En revanche, les effectifs sont répartis de manière homogène pour ce qui concerne l'ancienneté de l'activité (figure 4).

Une typologie décrivant à grands traits les espèces est donnée dans le tableau I. Cette typologie est constituée à partir du mode de production, du nombre d'espèces cultivées, du type d'irrigation, du type de cahier des charges, de la taille moyenne des exploitations et du conseil technique prédominant auprès des exploitants. Il existe une diversité significative au sein de chaque espèce (par exemple la répartition de l'activité entre plein champ et abri, ou le cahier des charges), mais l'espèce est souvent déterminante pour certaines caractéristiques, comme le mode d'irrigation (100% de goutte à goutte en tomate, 100% d'aspersion en haricot vert), le nombre d'espèces cultivées, ou la structure délivrant le conseil technique. Environ la moitié de l'effectif de l'échantillon a reçu une formation sur l'irrigation des cultures, surtout via des groupes de producteurs tels que les CETA ou les Chambres d'agriculture. On observe des différences en fonction de l'espèce : la quasi-totalité des producteurs de haricot vert en ont reçu, les 2/3 chez les producteurs de melon, environ la moitié en tomate, diversification et salade, et un pourcentage faible en carotte.

La moitié environ de l'effectif de l'échantillon possède du matériel de pilotage (figure 5). Il est probable que cette répartition ne traduise pas la réalité du taux d'équipement des exploitations légumières. En effet, comme précisé plus haut, les contacts de producteurs ont été obtenus via les personnes enquêtées lors de l'enquête « filière », qui ont probablement orienté la liste des noms donnés vers des personnes étant plus portées vers des outils de pilotage. L'échantillon de producteurs ainsi obtenu pourrait alors surreprésenter ceux qui possèdent du matériel de pilotage.

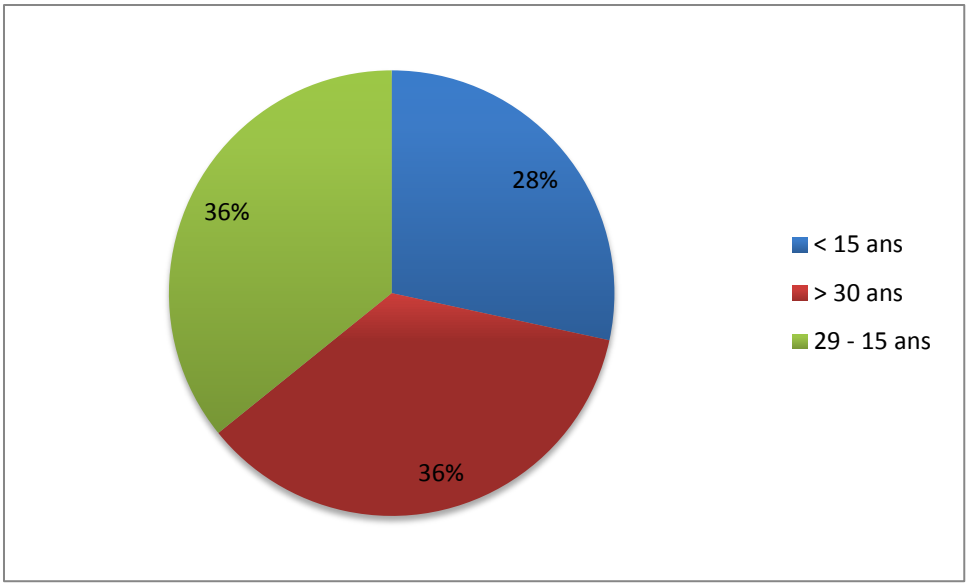

Figure 4 : Effectifs des enquêtes pour chaque classe d'ancienneté dans la profession d'exploitant agricole

Tableau I : Résumé des principales caractéristiques des espèces étudiées

	Répartition plein champ / abri	**Nombre d'espèces cultivées dans l'exploitation (classe)**	**Type d'irrigation majoritaire**	**% commercialisation en AB**	**Conseil technique majoritaire**	**Surface mini et maxi dans l'échantillon**
Carotte	60% plein champ et 40% sous-abris	3 à 10	100% aspersion	0 %	60% en chambre d'agriculture	7 ha à 1400 ha
Haricot vert	100% plein champ	1 à 2	100% aspersion	0%	66% par des groupes industriels	8 ha à 1400 ha
Tomate	90% sous-abris	3 à 10	100% goutte-à-goutte	25%	60% en CETA	1.5 ha à 21 ha
Melon	60% en plein champ et 40% sous-abris	3 à 10	80% goutte-à-goutte	14%	60% en CETA	1 ha à 88 ha
Salade	56% sous-abris et 44% en plein champ	3 à 10	100% en aspersion	7%	43 %. en CETA	1 ha à 183 ha
Cultures en diversification	85% sous-abris	>10	70% goutte-à-goutte	60%	46% en chambre d'agriculture	1.5 ha à 40 ha

3) Déterminants de l'équipement en matériel de pilotage

Question 1 : Est-ce que l'espèce est un déterminant de l'usage d'outils de pilotage de l'irrigation ?

Le taux d'équipement en matériel de pilotage varie très significativement en fonction de l'espèce (chi2=0.0003, figure 5). Il est de 100% en haricot vert, et ce chiffre est conforté par les informations obtenues dans l'enquête filière. En melon et en tomate, le taux d'équipement est d'environ 70-80%. Il chute à 40% en laitue, et est très faible en diversification et en carotte. Pour la carotte l'enquête « filière » fait apparaître de fortes disparités entre régions : en aquitaine, qui représente près de la moitié de la production française, le taux d'équipement en outils de pilotage est proche de 100%.

Question 2 : Quels sont les autres déterminants pour le pilotage de l'irrigation ?

Suivi technique x zone de production x espèce

L'hypothèse que le suivi technique des agriculteurs est un autre déterminant de l'équipement en matériel de pilotage a été examinée. Dans l'échantillon, un nombre élevé d'exploitations est suivi soit par une chambre d'agriculture, soit par un CETA, soit par une SICA, et une analyse a été faite au sein de cette sous-population. De ce sous-échantillon ont été exclues les exploitations produisant du haricot vert, où le suivi technique est essentiellement le fait de structures industrielles, et où, on l'a vu, le taux d'équipement est de 100%. Trois tableaux de contingences ont été examinés, représentant les fréquences des trois types de suivi technique (suivi ou non par une CA, suivi ou non par une SICA, suivi ou non par un CETA), croisés avec la possession ou non de matériel (tableau II). Des statistiques de chi2 ont été calculées pour ces trois tableaux de contingences. Dans les trois cas les tests sont significatifs, indiquant que le suivi technique a une influence sur l'équipement en matériel de pilotage : les exploitations suivies par des CA ou des SICA ont tendance à être moins équipées, tandis que les exploitations suivies par des CETA ont tendance à être plus équipées. **Il convient de ne pas tirer de ces résultats un enseignement général sur le lien entre type de structure de suivi technique et équipement en matériel de pilotage.** En effet, il y a dans l'échantillon des corrélations entre espèces, zones géographiques, et type de suivi technique, avec des regroupements d'exploitations situées dans une même zone géographique et bénéficiant du même suivi : des enquêtes menées dans d'autres exploitations, dans des régions différentes, suivi par d'autres CETA, d'autres SICA ou d'autres CA pourraient aboutir à des observations et des conclusions différentes. **On peut en revanche valider l'hypothèse initiale et conclure que le suivi technique est un déterminant de l'équipement en matériel de pilotage.** Ce constat est corroboré par l'enquête qualitative dans les filières de production : le volontarisme des responsables du suivi technique en matière de pilotage de l'irrigation est important pour inciter les producteurs à s'équiper.

En culture de haricot vert, l'ensemble des exploitants enquêtés possède du matériel de pilotage. Il n'est donc pas possible de faire le lien avec d'autres déterminants potentiels. Cependant, on peut faire l'hypothèse que le suivi technique par des industriels et les cahiers de charges commerciaux constituent de fortes incitations à s'équiper. Il ressort de l'enquête qualitative qu'un pilotage précis de l'irrigation permet de planifier les dates de récolte, planification indispensable lorsqu'il faut répondre aux exigences industrielles des usines de transformation.

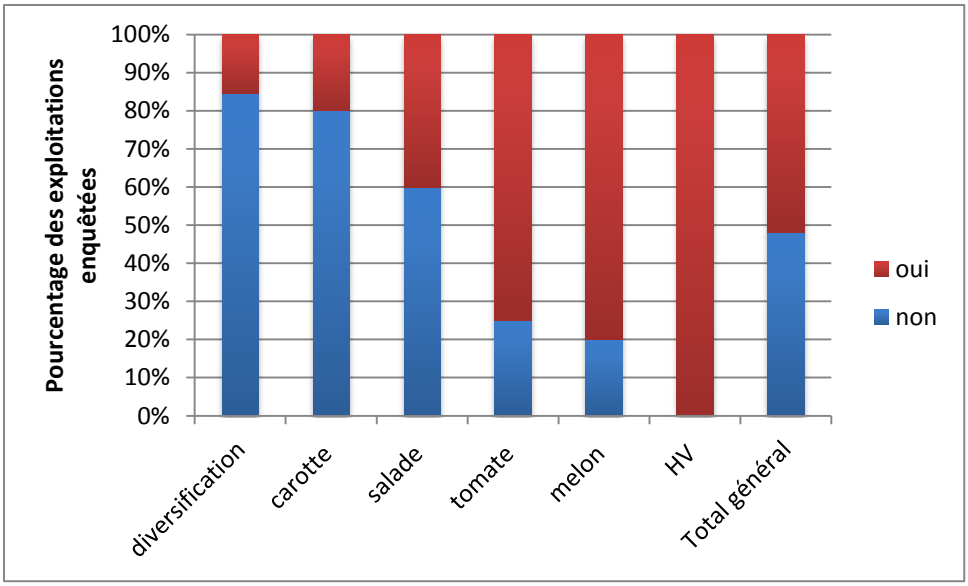

Figure 5 : Taux d'équipement observé en outils de pilotage dans l'échantillon enquêté, par espèce

Tableau II : Proportion des producteurs déclarant posséder ou pas du matériel de pilotage suivant le type d'accompagnement. CA : Chambre d'agriculture, CETA , centre d'études techniques agricoles, SICA : société d'intérêt collectif agricole

		Pas de matériel de pilotage	Matériel de pilotage	Statistique chi2
Suivi CA	Oui	91%	9%	<0.0001
	Non	34%	65%	Très significatif
Suivi SICA	Oui	87%	13%	0.002
	Non	42%	57%	Significatif
Suivi CETA	Oui	36%	64%	0.02
	Non	63%	36%	Significatif

En lien avec cette volonté, certains groupes industriels mettent à disposition des sondes installées chez les producteurs. Par la suite, soit l'information est centralisée et un conseil est donné aux producteurs concernant la dose d'irrigation à apporter, ou bien il y a un appui technique pour l'interprétation des données. L'ensemble de ces informations conduit à valider l'hypothèse d'un lien fort entre équipement et suivi technique.

Une information sommaire sur la capacité de drainage du sol (drainant vs pas drainant) ne permet pas, dans l'enquête quantitative auprès des producteurs, de faire un lien entre fonctionnement du sol et équipement. Cependant, l'enquête filière fait apparaître que dans la région sud-ouest et en particulier les Landes où se réalise 80% de la production de haricot vert de l'échantillon et 20% de la production de carotte, la question de l'irrigation est importante dans les itinéraires culturaux du fait de la texture de sol, principalement sableuse : les sols cultivés sont très filtrants et ont une faible réserve utile ; la gestion des apports en eau en lien avec les besoins de la culture permet de valoriser la ressource qui ne peut pas être stockée dans le sol .

Mobilisation d'indicateurs

Il a été demandé aux personnes enquêtées les indicateurs utilisés pour décider du déclenchement de l'irrigation (indépendamment de la possession et de l'utilisation d'outils de pilotage). Les résultats figurent dans le tableau III. La quasi-totalité des personnes enquêtées apprécie visuellement l'état du peuplement et une forte proportion vérifie visuellement l'état du sol. Plus de la moitié des enquêtés déclarent recourir à la météo. Le raisonnement lié à l'acquisition des données météo n'a pas été systématiquement explicité, aussi l'interprétation de cette proportion pourrait prêter à confusion. Les données météo servent principalement à évaluer a priori ou a posteriori la pluviométrie et l'humidité, les deux variables servant d'indicateurs en plein champ, la seconde seulement sous abri. Les personnes déclarant ne pas avoir recours à la météo pour la décision d'irrigation pourraient avoir omis cette prise en compte parfois implicite (« je n'irrigue pas si l'humidité de l'air est à saturation »). Par ailleurs, pour certaines espèces et dans certaines régions, l'irrigation est déterminée en fonction d'un tour d'eau : dans ces cas où le moment de déclenchement de l'irrigation est contraint, la situation météorologique n'a pas d'influence. D'autres indicateurs, comme les bulletins de préconisation d'irrigation, l'état hydrique du sol observé après prélèvement à la tarière, ou l'information sur l'ETP sont beaucoup plus faiblement mobilisés. L'utilisation des bulletins de préconisation est essentiellement observée dans la filière haricot vert (5 exploitations sur 6 y ont recours). La seconde partie du tableau III fait le lien entre ces sources d'informations et l'utilisation de matériel de pilotage. On a cherché à identifier les cas où le pourcentage d'équipement s'écartait significativement de la proportion de 50% attendue dans le sous-échantillon. La visualisation de la plante, du sol, et les bulletins de préconisation ne sont pas déterminants de l'équipement en matériel de pilotage. Pour le premier, la raison est que la quasi-totalité de l'échantillon a recours à l'indicateur. Les deux autres apparaissent comme des outils neutres vis-à-vis du pilotage de l'irrigation. En revanche, le fait d'avoir recours au prélèvement du sol à la tarière est lié à une tendance à ne pas s'équiper en outils de pilotage, tandis que l'utilisation de l'ETP est systématiquement associée à l'équipement. Enfin, plus de 80% des personnes ne se référant pas à la météo sont équipées en matériel de pilotage. L'ensemble des filières sont représentées dans la population ayant recours à l'ETP, et dans celle n'ayant pas recours à la météo. Cela traduit donc le comportement technique des agriculteurs et non le lien avec le mode de production.

Tableau III : Proportion des producteurs déclarant utiliser ou pas certains indicateurs dans la prise de décision de l'irrigation (haut du tableau), et proportion des producteurs mobilisant ces indicateurs dans les sous-population possédant ou ne possédant pas de matériel de pilotage (bas du tableau). 'Visualisation plante' : observation du peuplement végétal, 'Visualisation sol' : observation de l'état du sol superficiellement, 'Bulletin de préconisation' : document publié par certains organismes et qui conseille sur les périodes et les doses d'eau à apporter, 'Tarière' : prélèvements de sol à la tarière et appréciation de l'humidité, 'Météo' : prise en compte des bulletins météo, 'ETP' : prise en compte des données d'évapotranspiration potentielle. Exemple de lecture pour l'indicateur « données météo »: 65% des personnes enquêtées déclarent utiliser les données météo pour décider de leur irrigation. Parmi elles, 36% utilisent des outils de pilotage de l'irrigation. 35% n'utilisent pas les données météo, et parmi elles 82% ont recours à des outils de pilotage.

	Visualisation plante	**Bulletin de préconisation**	**Visualisation sol**	**Tarière**	**Météo**	**ETp**
% de producteurs mobilisant l'indicateur	93%	11%	72%	17%	65%	14%
% de producteurs ne mobilisant pas l'indicateur	7%	89%	28%	83%	35%	86%
Mobilisent l'indicateur et possède du matériel de pilotage	53%	67%	50%	**29%**	36%	**100%**
Mobilisent l'indicateur et ne possèdent pas de matériel de pilotage	33%	50%	56%	57%	**82%**	44%
Statistique Chi2	Non significatif	Non significatif	Non significatif	0.04 significatif	0.0006 significatif	<0.0001 très significatif

Cette sensibilité technique, allant dans le sens de l'utilisation d'outils directement pertinents vis-à-vis de l'irrigation (ETP) ou d'autres étant moins directement pertinents (météo, tarière) pour juger des besoins en eau des cultures semble montrer que **les personnes qui possèdent du matériel de pilotage sont celles qui mobilisent les indicateurs les plus adaptés**. **On peut donc en conclure un lien entre connaissances des indicateurs appropriés d'évaluation de la demande climatique d'une part et équipement en outils de pilotage d'autre part**.

Autres déterminants possibles

Les analyses en tableaux croisés et les tests statistiques montrent que le nombre d'années d'exercice du producteur, le nombre d'espèces cultivées sur l'exploitation et la participation à une formation sur l'irrigation ne semblent pas être des déterminants de la possession de matériel de pilotage.

Question 3 : y a-t-il un lien entre le pilotage et les résultats agronomiques attendus de l'irrigation ?

Lors des enquêtes avec les producteurs des questions ont été posées relatives aux liens entre l'irrigation et résultats agronomiques : rendement des cultures, qualité des produits de récolte, maladies, et lessivage des éléments nutritifs. Les résultats ont été analysés de manière à identifier si l'espèce influençait la perception des exploitants (tableau IV). La quasi-totalité de l'échantillon, quelle que soit l'espèce, identifie un lien entre irrigation et rendement, et une proportion importante voit un lien entre irrigation et lessivage. Un effet de l'espèce est en revanche observable pour le lien entre irrigation et qualité, souligné plus fréquemment chez les producteurs de melon et ceux en diversification. Le lien entre irrigation et maladies est souligné par la quasi-totalité des producteurs de salade et haricot vert, contre environ 2/3 dans les autres filières.

On constate que **les enjeux agronomiques liés à l'irrigation ne sont pas des déterminants de l'équipement en matériel de pilotage**. Quel que soit le résultat agronomique envisagé, on trouve autant de personnes équipées en matériel de pilotage parmi celles qui voient un effet de l'irrigation que parmi celles qui n'en voient pas. Ceci est illustré sur la figure 6 présentant une analyse des correspondances multiples (ACM) comprenant les variables de résultats agronomiques et l'équipement en matériel de pilotage. Les valeurs de la variable correspondant à l'équipement en matériel de pilotage (pil_oui et pil_non) se séparent le long de l'axe vertical. Elles se distinguent de celles discriminant sur l'axe horizontal les personnes ayant tendance à voir des effets importants de l'irrigation sur les résultats agronomiques (à gauche sur l'axe horizontal), et celles qui n'en voient pas (à droite sur l'axe horizontal). L'indépendance de la variable pilotage et des variables de résultats agronomiques se traduit par la position médiane de ces dernières sur l'axe vertical. L'agrégation des réponses positives aux effets de l'irrigation sur les variables agronomiques (entourées à gauche) et des réponses négatives (entourées à droite) montre en revanche que les personnes qui ne voient pas d'effet sur une variable agronomique particulière ont tendance à minorer les effets de l'irrigation en général. Cette absence de lien entre possession de matériel de pilotage et résultats agronomiques peut paraître paradoxale. Cela souligne que même si les producteurs sont conscients pour la plupart des liens entre irrigation et résultats agronomiques, la maîtrise de l'irrigation par rapport à des objectifs de qualité ou d'absence de maladie et de lessivage ne s'accompagne pas forcément de l'équipement en outils de pilotage.

Tableau IV : Proportion des producteurs déclarant voir un lien entre l'irrigation et différents résultats agronomiques

	Irrigation/qualité	Irrigation/maladies	Irrigation/lessivage	Irrigation/rendement
Carotte	40%	60%	80%	100%
Diversification	100%	80%	100%	100%
Haricot vert	50%	100%	100%	100%
Melon	100%	60%	93%	100%
Salade	60%	95%	85%	96%
Tomate	75%	75%	83%	100%

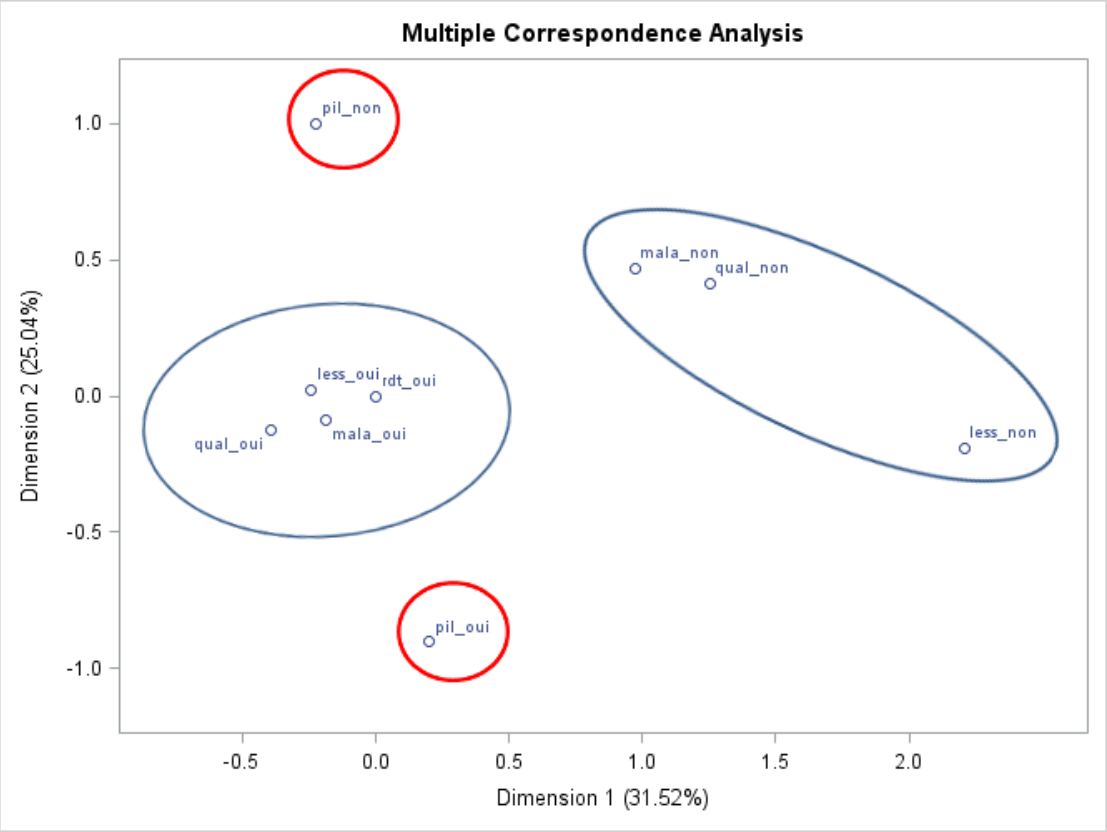

Figure 6 : Représentation graphique de l'analyse des correspondances multiples avec la variable « possession de matériel de pilotage » (pil), et les variables reliant irrigation et résultats agronomique : 'less' : lessivage, 'qual' : qualité, 'rdt' : rendement, 'mala' : maladies.

Le pilotage servirait donc plus à s'assurer d'une irrigation efficace pour l'obtention d'un bon rendement (et éventuellement d'un moindre lessivage) qu'à obtenir des résultats en matière de maladies et de qualité. Pour aller plus loin, il faudrait questionner les règles de décision associées aux capteurs, afin d'étudier si les outils de pilotage permettent ou pas de maîtriser les aspects qualitatifs et prophylactiques de la production. Sans étudier cette question de manière complète, on peut avancer deux observations : en premier lieu, l'enquête qualitative dans les filières montre que relativement peu de résultats expérimentaux liant pilotage de l'irrigation et qualité des produits sont disponibles. Cela a probablement une influence sur l'utilisation de règles de décision adaptées à ces objectifs. En second lieu, on peut observer que dans d'autres types de production agricole, notamment en arboriculture, la maîtrise de l'irrigation en rapport avec la qualité des fruits passe fréquemment par l'utilisation de capteurs positionnés directement sur les plantes. Ce type de capteurs n'est pas utilisé en productions légumières.

4) Matériel utilisé

Question 4 : L'essentiel du parc de capteurs est-il constitué de capteurs posés dans le sol ?

L'enquête auprès des producteurs montre que les capteurs utilisés sont des sondes insérées dans le sol. 80% sont des sondes tensiométriques, réparties entre les tensiomètres à eau, les sondes watermark, et les sondes watermark monitor (figure 7). Les sondes watermark totalisent à elles seules presque 60% de l'équipement. Le reste des capteurs est constitué de sondes capacitives, qui sont utilisées principalement en production de légume d'industrie. Il ressort de l'enquête qualitative auprès des détaillants que la préférence pour les sondes tensiométriques vient de l'autonomie d'utilisation qu'elles confèrent au producteur, alors que les sondes capacitives s'associent plus fréquemment à un conseil d'utilisation donné dans le cadre d'une prestation de service. A cet argument de facilité d'utilisation et d'interprétation s'ajoute celui du coût, les sondes tensiométriques étant moins chères que les sondes capacitives. La règle de décision pour les sondes tensiométriques est à 70% basée sur des seuils de déclenchement d'irrigation. Certains producteurs utilisent les sondes pour comparer des valeurs de potentiel hydrique à différentes profondeurs, sans se baser sur des valeurs absolues de seuils. L'hypothèse selon laquelle l'essentiel du pilotage de l'irrigation en cultures légumières est basé sur des capteurs sols est donc validée.

Les données obtenues dans les enquêtes ne permettent pas d'avoir une vision globale du parc de capteurs sur le territoire national. Cependant, on fait le constat d'après les enquêtes que le nombre de capteurs par unité de surface est plus élevé pour les légumes fruits et les exploitations en diversification en comparaison aux exploitations majoritairement en haricot vert et en carotte. Du fait de tailles d'exploitations et de parcelles plus réduites, on peut faire l'hypothèse que le marché, en termes de nombre de capteurs, est potentiellement plus important dans les productions de légumes fruits. Cette hypothèse devrait être consolidée par d'autres sources d'informations portant sur les ventes par type d'espèces, que nous n'avons pas recueillies.

Question 5 : Quel est le taux d'utilisation du matériel ?

La possession de matériel de pilotage n'implique pas toujours leur utilisation. **On observe globalement un taux d'utilisation du matériel de 60 à 70%**.

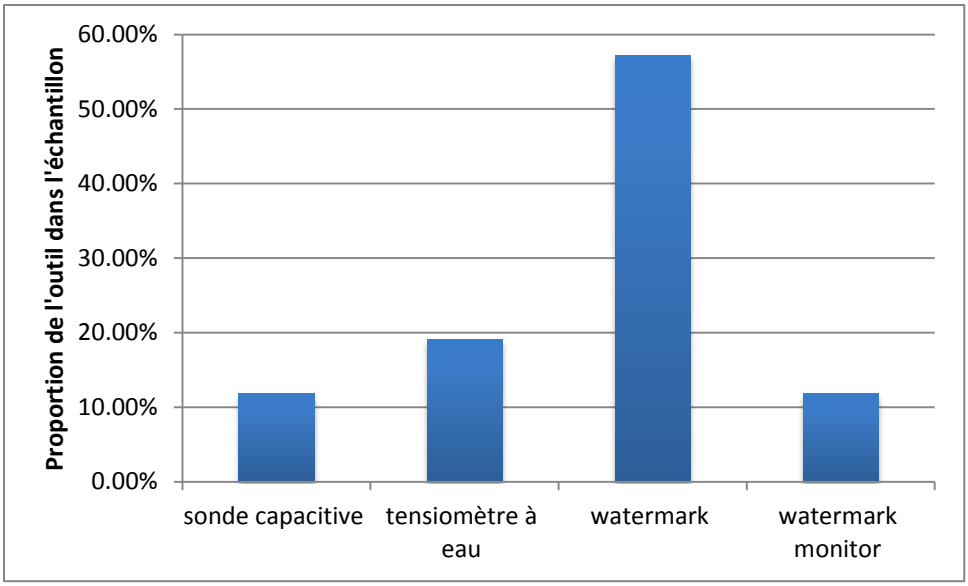

Figure 7 : Répartition des différents outils au sein de la population possédant du matériel de pilotage

Tableau V : En haut : proportion des producteurs, parmi la population ne possédant pas de matériel de pilotage, déclarant vouloir s'équiper ou non suivant qu'ils reconnaissent des effets de l'irrigation sur 4 ou au plus 3 effets de l'irrigation sur les résultats agronomiques (maladie, rendement, lessivage, et qualité). Au milieu : proportion des producteurs déclarant vouloir s'équiper ou non en fonction du nombre d'années d'exercice de la profession. Dernière ligne : proportion de producteurs souhaitant s'équiper dans la population ne possédant pas déjà de matériel de pilotage.

	Volonté de s'équiper = oui	**Volonté de s'équiper=non**
Effets de l'irrigation sur les résultats		
4 effets	44%	56%
3 effets ou moins	21%	79%
Nombre d'années d'exercice de la profession		
< 15 ans	45%	55%
15-29 ans	44%	56%
> 30 ans	17%	83%
Effectif total		
	36%	64%

Ce taux d'utilisation est sensiblement le même pour les différents types de capteurs, néanmoins on observe que toutes les exploitations utilisant des watermarks monitor font usage du matériel, ce qui semble indiquer que les capteurs de nouvelle génération, équipés de systèmes efficaces de récupération des données, sont plus utilisés que les capteurs plus anciens. Le coût d'équipement plus élevé pour ces capteurs pourrait également expliquer leur plus fort taux d'utilisation. Par ailleurs, on n'observe pas de lien significatif statistiquement entre l'espèce et le taux d'utilisation du matériel. Il semble cependant un peu plus faible en laitue. Cela pourrait s'expliquer par le fait qu'un certain nombre de producteurs de salade cultivent d'autres espèces, et que les outils de pilotage sont destinés à ces autres espèces plutôt qu'à la laitue.

Les producteurs ont été interrogés sur leurs motivations pour utiliser le matériel. **Une forte proportion de ceux qui n'utilisent pas le matériel de pilotage qu'ils ont acquis déclare ne pas savoir s'en servir correctement, ou ne pas bénéficier de l'assistance technique nécessaire à l'utilisation de ces capteurs.** Il faut y voir là la raison principale de ne pas utiliser le matériel. Les producteurs ont indiqué les contraintes qu'ils percevaient à l'utilisation du matériel de pilotage. Les producteurs utilisant des capteurs avec des relevés manuels des sondes trouvent l'occasion de réaliser un acte de contrôle général sur l'ensemble de la parcelle en relevant les données sur les capteurs. Certains producteurs, en particulier ceux qui exploitent des sols sableux, déplacent les sondes tensiométriques assez régulièrement pour prendre à l'instant t la mesure de l'eau dans le sol, et dans ce cas ils mettent en avant la praticité dans le déplacement des sondes. Les sondes équipées de télétransmission sont quant à elles appréciées des producteurs ayant un grand parcellaire et qui ne se rendent pas tous les jours sur les parcelles.

5) Freins à l'équipement en matériel de pilotage

Le sous-échantillon constitué par les exploitations non équipées en matériel de pilotage a été étudié pour dégager les raisons du désintérêt ou de l'intérêt pour ces outils. Ce sous échantillon représente 39 individus, soit 48 % des enquêtes. Environ deux tiers (64%) ne souhaitent pas s'équiper, contre un tiers qui souhaiterait disposer de matériel de pilotage (Tableau V). Malgré de possibles biais du fait de l'échantillon réduit, l'espèce ne semble pas être déterminante de cette répartition. **Parmi les personnes ne possédant pas de matériel de pilotage, un peu moins de la moitié (45%) ne connaît pas précisément les capteurs disponibles**.

Question 6 : Les personnes ne souhaitant pas s'équiper en matériel de pilotage connaissent-ils moins bien les technologies disponibles ?

Les motivations des personnes souhaitant ou ne souhaitant pas s'équiper, parmi celles qui ne possèdent pas de matériel de pilotage (39 enquêtes), ont été étudiées. On constate que **la volonté de s'équiper en matériel de pilotage ne dépend pas de la connaissance du matériel**, puisque la même proportion d'individus, un tiers, déclare vouloir s'équiper dans les populations connaissant et ne connaissant pas le matériel. Une ACM a été réalisée afin de lier la volonté de s'équiper, la mobilisation d'indicateurs pour l'irrigation, la reconnaissance des impacts sur les résultats agronomiques, et la connaissance du matériel. La représentation graphique de cette ACM est donnée dans la figure 8.

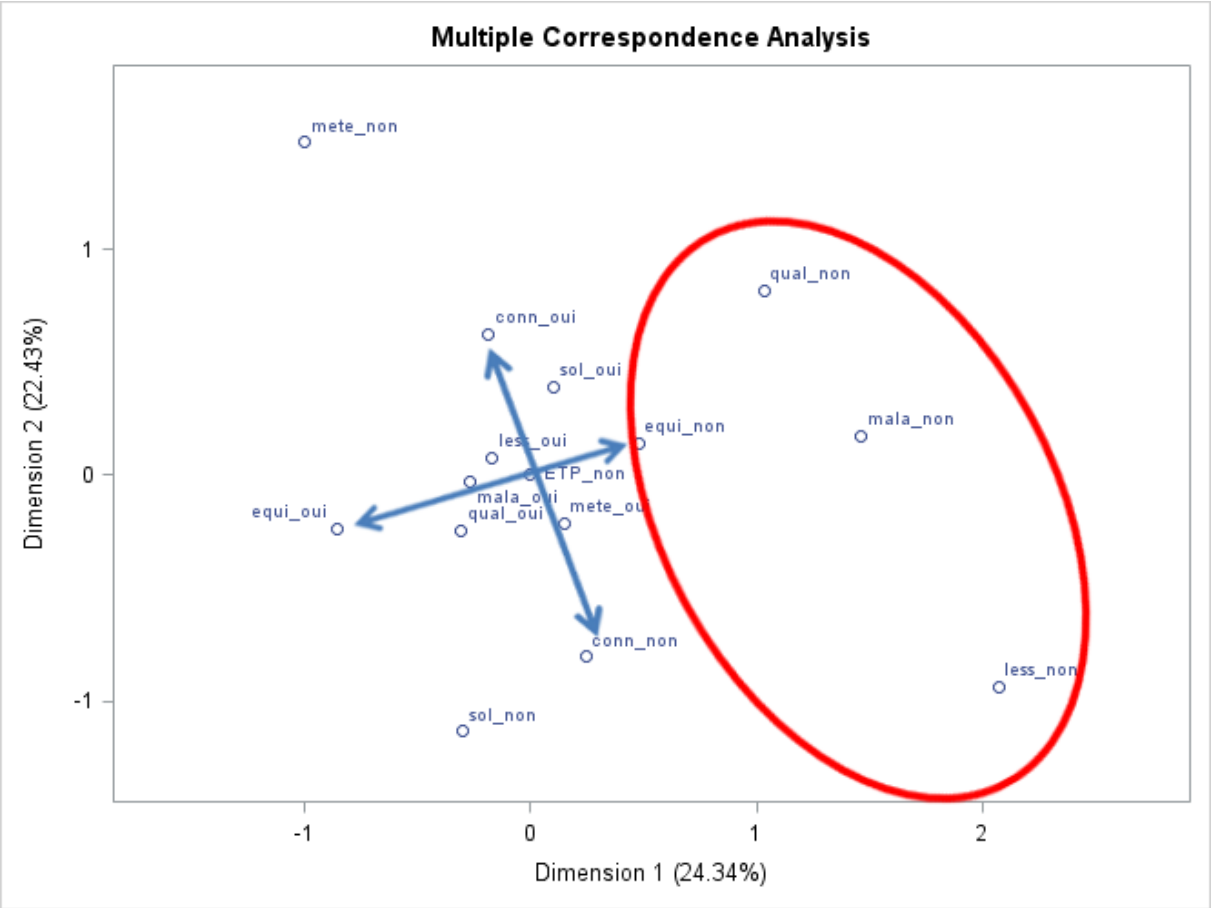

Figure 8 : Représentation de l'analyse des correspondances multiples mettant en relation la volonté de s'équiper en matériel de pilotage de l'irrigation (equip_oui et equip_non), la connaissance des outils disponibles (conn_oui et conn_non), les variables décrivant les indicateurs mobilisés pour l'irrigation ('mete_oui' 'mete_non' :météo 'sol_oui' 'sol_non' :visualisation du sol, 'ETP_oui' 'ETP_non' : utilisation de l'ETP,) et les variables reliant irrigation et résultats agronomiques ('qual_oui' 'qual_non' : qualité , 'less_oui' 'less_non' : lessivage, 'mala_oui' 'mala_non' : maladies). Entouré à droite les valeurs des variables associées à droite selon l'axe synthétique horizontal (volonté de ne pas s'équiper en matériel et affirmation de l'absence d'effet entre irrigation et qualité, maladie, ou lessivage); les flèches montrent l'orthogonalité entre deux groupes de variables (connaissance du matériel et volonté de s'équiper en matériel de pilotage).

Cette analyse conforte le constat d'une absence de lien direct entre la connaissance du matériel et la volonté de s'équiper (flèches sur la figure 8). Ce résultat peut sembler surprenant, dans la mesure où l'on peut questionner la volonté de s'équiper chez des personnes ne connaissant pas le matériel. On peut avancer l'hypothèse selon laquelle les personnes interrogées, même si elles n'ont pas une connaissance précise des capteurs disponibles, savent qu'il existe des outils permettant de mieux gérer l'irrigation, et seraient potentiellement intéressées par un accès à la connaissance et l'utilisation de ces outils. La volonté de s'équiper apparaît plutôt liée à la reconnaissance des effets agronomiques de l'irrigation. Cette constatation est fondée sur l'observation que les réponses exprimant une volonté de ne pas s'équiper (equip_non) sont associées à celles qui ne reconnaissent pas d'effets de l'irrigation sur une au moins des impacts agronomiques étudiés (qual_non, less_non et mala_non sont situées à droite du graphique, du côté de equip_non : cercle rouge sur la figure 8). On a vu plus haut que le lien avec les résultats agronomiques n'était pas lié à l'équipement en matériel de pilotage des exploitations. On montre ici que le lien entre les résultats agronomiques et la volonté de s'équiper (parmi les exploitants qui ne le sont pas) est plus significatif. Ce résultat est représenté d'une autre manière dans le tableau V. Le pourcentage de personnes disposées à s'équiper parmi le sous-échantillon déclarant qu'il existe un lien entre l'irrigation et l'ensemble des 4 indicateurs de résultats agronomiques (rendement, lessivage, maladies, qualité) est légèrement supérieur au pourcentage observé dans l'échantillon global (44% vs 36%). En revanche, parmi le sous-échantillon où il n'est pas fait de lien entre l'irrigation et au moins un indicateur de résultats agronomiques, le pourcentage de personnes déclarant vouloir s'équiper est plus faible (21%). Le test du chi2 ' ($p=0.15$) ne conclue cependant pas à un résultat significatif. On peut penser que la tendance détectée dans l'ACM pourrait être observée avec un test sur tableau de contingence plus robuste par la taille de l'échantillon observé. **Les données montrent ainsi une tendance chez les personnes qui ne souhaitent pas s'équiper en technologies de pilotage à ne pas reconnaître d'impacts de l'irrigation sur les résultats agronomiques**. Enfin, on observe également sur le tableau V des différences de volonté de s'équiper suivant le nombre d'années d'exercice de la profession : le pourcentage de personnes souhaitant s'équiper est plus de deux fois plus faible (17% contre 44% et 45%) dans la sous-population en exercice depuis plus de 30 ans. Dans ce second cas également, le test n'est pas significatif. On peut cependant présager un lien entre l'âge des exploitants et l'attrait pour l'évolution technologique de l'exploitation.

En conclusion, on ne peut pas valider l'hypothèse selon laquelle la volonté de s'équiper dépend de la connaissance du matériel, mais on identifie un autre déterminant chez les personnes enquêtées: les perceptions des effets agronomiques de l'irrigation. Corroborant ces résultats, on peut noter que dans les enquêtes, un certain nombre de producteurs ont déclaré ne pas s'intéresser à ces technologies de pilotage, jugeant que leurs pratiques d'irrigation étaient satisfaisantes en l'état. On ne peut vérifier la pertinence de cette déclaration, puisqu'une analyse objective de l'efficience de l'irrigation (WUE ou autres indicateurs) au sein de la population enquêtée irait au-delà des objectifs de cette étude.

6) Evolution des outils de pilotage

Question 7 : A court et moyen terme, les évolutions des outils porteront-elles plus sur la transmission et l'analyse automatique des données que sur la nature des capteurs ?

Tableau VI : Proportions des personnes déclarant souhaiter associer leur matériel de pilotage à une assistance technique, à la télétransmission des données, et à l'automatisation du déclenchement de l'irrigation par l'outil de pilotage.

	Assistance technique = oui	**Télétransmission = oui**	**Automatisation = oui**
Exploitants déjà équipés	78 %	37%	15%
Exploitants souhaitant s'équiper	92%	92%	50 %
Statistique chi2	Non significatif	P=0.0003 Significatif	P=0.0072 Significatif
Ne voulant pas s'équiper	8%	4%	8%
Total	60%	35%	18 %

L'étude bibliographique a montré que les principales technologies pour la maîtrise de l'irrigation portaient sur la mesure de l'état hydrique du sol (teneur en eau du sol ou potentiel hydrique) ou des plantes. En cultures légumières, on a vu que seuls les capteurs sols étaient utilisés, et que la mesure du potentiel hydrique était prédominante. Dans cette étude, nous n'avons pas obtenu d'information fiable permettant d'estimer l'évolution des parts de marché entre les sondes capacitives et les capteurs basés sur le potentiel hydrique. On observe cependant que **ni la bibliographie, ni les enquêtes auprès des fabricants de matériel et des détaillants ne laissent percevoir une évolution des types de capteur à court terme**. Les évolutions actuelles portent principalement sur l'acquisition et la transmission des données, avec la généralisation de capteurs disposant de technologies de transmission de données basées sur la GPRS (General Packet Radio Service, utilisée en téléphonie mobile). Cette technologie permet l'envoi des informations perçues par les capteurs directement sur des téléphones portables ou des ordinateurs, via des boitiers relais. Des logiciels permettant une synthèse et une analyse plus ou moins poussée des informations reçues sont également disponibles. A moyen terme, on peut penser que les outils de pilotage intègreront des règles de décision, permettant une automatisation totale de l'irrigation, depuis l'acquisition d'information jusqu'à l'ouverture et la fermeture des vannes ouvrant et fermant les circuits de distribution. Ces technologies sont déjà disponibles mais pas encore utilisées dans le cadre des productions maraîchères d'après les fabricants. Dénommée par le terme « smart irrigation », cette technique s'est mieux développée en arboriculture, ou pour les espaces verts des collectivités. **Les fabricants de matériel de pilotage déclarent vouloir développer la « smart irrigation » pour les cultures légumières.**

Les exploitants agricoles ont été interrogés sur leur perception des technologies de transmission de données et d'automatisation. En complément, il leur a été demandé s'ils souhaitaient disposer d'assistance technique dans la mise en œuvre des outils de pilotage.

Question 8 : Les exploitants agricoles sont-ils favorables à l'évolution des technologies de pilotage ?

Le tableau VI donne le pourcentage de personnes favorables aux évolutions technologiques mentionnées ci-dessus, dans l'échantillon total, et au sein des sous-populations constituées des personnes équipées en outils de pilotage, non équipées et souhaitant s'équiper, ou non équipées et ne souhaitant pas s'équiper. **Les personnes ne souhaitant pas s'équiper, pour plus de 90% d'entre elles, n'ont pas d'intérêt pour le suivi technique des capteurs et l'évolution des technologies**. Les résultats des tests, tous très significatifs, ne sont pas montrés. Des statistiques plus fines (données dans le tableau VI) ont porté sur les sous-groupes de personnes déjà équipées ou souhaitant le faire, c'est-à-dire celles qui portent un intérêt au matériel de pilotage.

Une grande majorité des personnes déjà équipées (78%) ou souhaitant s'équiper (92%) encouragent l'assistance technique à l'utilisation des outils de pilotage. La différence entre ces deux groupes n'est pas statistiquement significative sur ce point. En revanche, significativement plus de personnes non équipées mais souhaitant le faire seraient favorables, en comparaison avec les personnes déjà équipées, à la télétransmission des données (92% contre 37%).

Tableau VII : Proportions des personnes déclarant connaître ou pas le matériel existant suivi qu'elles aient suivi ou pas une formation sur l'irrigation.

	Déjà participé à une formation = oui	**Déjà participé à une formation = non**
Connaissance du matériel de pilotage = oui	97%	56%
Connaissance du matériel de pilotage = non	3%	44%
Total	50%	50%

Chez les personnes déjà équipées et ne bénéficiant pas de services de télétransmission, il y a en conséquence une réticence importante à l'évolution de leur outil de pilotage. Dans les entretiens réalisés, les agriculteurs déclaraient être satisfaits de leur outil, et ne voyaient pas l'avantage supplémentaire de la télétransmission. **Globalement, une forte réticence à l'évolution vers l'automatisation de l'irrigation par les outils de pilotage a été observée dans l'échantillon : seuls 18% des exploitants interrogés souhaiteraient disposer de cette technique**. Cependant les personnes non équipées et souhaitant le faire sont significativement plus favorables à des systèmes de pilotage automatisés que les personnes déjà équipées (50% contre 15%). Comme l'installation du pilotage automatique nécessite un réseau de câbles importants (pour le raccordement aux électrovannes), on peut penser qu'avec une restructuration du réseau d'irrigation une automatisation est plus envisageable. Il est aussi important de tenir compte du fait qu'un pilotage automatique n'est pas possible dans toutes les exploitations ni pour toutes les cultures ; en effet, certaines exploitations (surtout en salade de plein champ) qui irriguent avec des canons et des enrouleurs doivent à chaque « tour d'eau » déplacer le matériel d'irrigation. L'automatisation semble donc difficile dans ces cas là puisque il ne faut pas seulement prendre en compte le besoin en eau, mais aussi des contraintes logistiques. **Dans les entretiens avec les exploitants, il est apparu qu'une partie de la réticence à l'automatisation venait d'un questionnement sur la fiabilité des outils. Dans les enquêtes filières auprès des fabricants et des détaillants de matériel, il n'est pas apparu que les systèmes automatisés (existant déjà dans d'autres types de production agricole ou pour les espaces verts) pouvaient poser des problèmes de fiabilité**. Cette réticence à l'automatisation de l'irrigation observée chez les agriculteurs relève donc d'interrogations concernant la maturité de la technologie en production légumière. On constate une divergence d'avis entre les fournisseurs et les utilisateurs de matériel de pilotage. Une partie des opinions des exploitants pourrait aussi refléter la crainte d'être dépossédé d'un choix d'intervention stratégique dans l'itinéraire technique, dans la mesure où tous les producteurs reconnaissent les impacts potentiels de l'irrigation au moins sur leur rendement : cela traduirait une aversion au risque, objectif ou non, d'une délégation de pouvoir de décision à un automate. Une personne interrogée dans l'enquête auprès des agents de la filière suggère ainsi que « cette réticence existe tant que l'automatisation n'a pas démontré sa fiabilité, or comme le pilotage actuel est perçu comme satisfaisant, il n'y a pas de volonté de prise de risques ». Le rejet provient aussi de l'incertitude météorologique, plus importante en culture de plein champ. En outre, si les coûts d'investissement sont exclusivement à la charge de l'exploitant, le bénéfice perçu peut paraître insuffisant.

7) Besoins de formation des utilisateurs

Question 9 : Y a-t-il des besoins en formation sur l'irrigation et son pilotage ?

Plus des deux-tiers des personnes interrogées souhaiteraient assister à une séance de formation technique sur l'irrigation (Tableau VII). Ce constat est fait pour toutes les espèces étudiées. En général, les souhaits portent sur une approche transversale brossant les différents aspects liés à l'irrigation : matériels disponibles, outils de pilotage, approches économiques, impacts agronomiques. La proportion de personnes souhaitant bénéficier d'une formation n'est pas différente entre les sous-populations ayant et n'ayant pas déjà bénéficié d'une formation sur le thème dans le passé. Cela traduit un souhait de mise à jour des connaissances par rapport à des technologies en évolution. On observe par ailleurs un lien très significatif entre connaissance des

outils de pilotage de l'irrigation et participation antérieure à une formation sur l'irrigation (tableau VII). Cependant, comme cela a été indiqué plus haut, il n'y a pas de lien fort entre la participation à une formation sur l'irrigation et la possession de matériel de pilotage. **La formation constitue un accès indéniable à la connaissance des outils de pilotage, mais n'est pas déterminante sur la volonté de s'équiper.**

Discussion et recommandations

1) Développer la diffusion des outils de pilotage dans les différentes filières

Il est apparu clairement que le taux d'équipement en outils de pilotage variait en fonction des filières de production. On peut expliquer cette réalité en considérant l'importance du soutien technique et des cahiers des charges de production, qui sont comme nous l'avons vu de forts incitateurs pour l'équipement, en l'absence de contraintes règlementaires. **D'un point de vue agronomique cependant, il n'y a pas de raison de penser que le pilotage de l'irrigation, et ses conséquences sur l'efficience de l'eau et les risques de pollution ou de rejet de gaz à effet de serre, soit plus légitime pour une espèce qu'une autre.** On peut en revanche estimer qu'un pilotage fin des apports d'eau a plus de conséquences sur la qualité des produits de récolte et le risque lié aux bioagresseurs chez certaines espèces. Mais on a vu que le lien entre irrigation et qualité d'une part et irrigation et maladies d'autre part est autant perçu dans les filières où le taux d'équipement *estimé* en matériel de pilotage est important (haricot vert, melon) que dans les filières où il est faible (salade, diversification). En conséquence, comme la revue de la littérature scientifique montre de manière indéniable le bénéfice agronomique et environnemental d'une quantification précise des besoins en eau des cultures, on peut conclure que la généralisation des outils de pilotage dans toutes les filières serait une évolution bénéfique. Ce bénéfice serait retiré par la société en général du fait du respect de l'environnement, mais il faut souligner que beaucoup d'agriculteurs, en l'absence d'incitations et dans un contexte de prix de l'eau bas, ne retirent pas de bénéfice économique (plus-value dans le prix des productions ou avantages financiers ex PAC) important d'une utilisation d'outils de pilotage. En outre, il a été montré à plusieurs reprises dans l'exposé des résultats que l'information, la connaissance des mécanismes en jeu et le soutien technique sont primordiaux pour le développement de l'utilisation des outils de pilotage.

Recommandation 1 : assurer la diffusion de la connaissance et des techniques

R.1.1 : proposer des formations destinées aux différents acteurs. Il a été montré que le besoin d'information portait à la fois sur les aspects théoriques (phénomènes en jeu, impacts) et pratiques de l'irrigation (matériel disponible, usage). **Il est probable que ce besoin d'information ne concerne pas seulement les producteurs, mais aussi une partie des conseillers techniques**.

R.1.2 : mieux formaliser le besoin de suivi et de conseils en fonction des outils. Une bonne utilisation des capteurs et des outils de transmission et d'interprétation des données nécessite un appui au producteur utilisateur. Il apparaît une grande variété de situations, entre des exploitations ou des groupes d'exploitations entièrement soutenues pour la prise en main et l'utilisation des outils, parfois utilisés de manière collective, et des exploitations où les producteurs ne bénéficient pas d'appui et abandonnent les outils. Il apparaît également que ce soutien technique n'est pas tant du ressort des fournisseurs de matériel dans le cadre d'un contrat de maintenance, que des structures de suivi technique des exploitations. Cependant il est apparu dans les enquêtes qu'il n'y avait pas de

consensus au sein des différents acteurs pour savoir à qui incombe le suivi technique. Or cette étude montre aussi que la diversité des sources de conseil et les perceptions variables par les conseillers des problématiques agronomiques liées à l'irrigation conduisent à des écarts d'accès au conseil et au suivi assez significatifs. **Une réflexion au sein des filières dans les différentes régions de production au sujet de la prise en charge de la thématique du pilotage de l'irrigation semble nécessaire.** Les démarches visant à un partage de l'information captée chez différents utilisateurs et la génération de recommandations collectives paraît intéressante mais limitée à certaines filières, car dans de nombreux cas la diversité des situations de production (cultures x calendrier cultural x contexte pédoclimatique x itinéraire technique) est un frein à ce type d'évolution.

Recommandation 2 : Evaluer les marges de progrès en irrigation

Le taux d'équipement en outils de pilotage observé dans l'échantillon, de 50%, est probablement supérieur au taux réel du fait d'un échantillonnage non entièrement aléatoire. Par ailleurs, près des deux-tiers des agriculteurs non équipés ne souhaitent pas l'être. **On peut donc estimer qu'une proportion significative des producteurs de légumes, probablement la majorité, ne souhaite pas s'équiper en outils de pilotage.** L'enquête laisse entendre que pour une bonne partie, les agriculteurs non équipés jugent leurs pratiques d'irrigations adaptées. Ce jugement gagnerait à être objectivé.

R.2.1. Renseigner l'efficacité réelle des pratiques d'irrigation. Plusieurs outils simples permettent d'estimer la pertinence des apports d'eau par rapport aux besoins. Certains sont liés à l'estimation de la demande climatique (utilisation de l'ETP et des coefficients culturaux par espèce). D'autres mettent en rapport la quantité d'eau apportée au rendement des cultures, avec des ordres de grandeurs disponibles par espèce. L'utilisation de ces outils pourrait **permettre d'évaluer relativement facilement, dans les exploitations, les niveaux de performance des pratiques d'irrigation.** Il serait alors possible d'évaluer, par enquête, les performances dans les différentes filières/zones de production.

*R.2.*2. *Réaliser et diffuser des essais comparatifs sur site et en station*. On dispose d'assez peu d'études à l'échelle nationale comparant les résultats obtenus avec une irrigation basée sur des pratiques standard (sans outils de pilotage) et une irrigation pilotée. Ces études aboutissent généralement à la conclusion que des économies d'eau sont faites en utilisant les outils de pilotage. Il conviendrait donc de **multiplier les acquisitions de références, en stations expérimentales et en exploitations, dans la diversité des situations de production**. Ici les structures de conseil technique pourraient avoir un rôle à jouer, avec une acquisition de matériel collective dans un premier temps, permettant de faire des essais à tour de rôle dans les différentes exploitations suivies. Cette démarche de démonstration collective pourrait avoir un effet d'incitation auprès des producteurs pour s'équiper individuellement.

2) Développer des outils adaptés aux besoins

La démonstration de la robustesse des outils de pilotage, quant à leur capacité à décrire correctement l'état hydrique du sol, a été rappelée dans la partie bibliographique. Cependant, de la calibration de la gamme de réponse du signal mesuré à la définition d'objectifs d'états hydriques du

sol adaptés à chaque contexte de production, en passant par l'acquisition, la transmission, et l'interprétation des données, il pourrait y avoir une diversité d'outils de pilotage qui n'apparaît ni dans les propositions d'outils par les fabriquant et les revendeurs de matériel, ni dans les perceptions de ces outils par les conseillers et des producteurs. Par ailleurs, il a été montré dans cette étude que les outils devraient pouvoir servir à un dialogue entre les conseillers techniques et les exploitants agricoles. On peut décrire autrement cette attente en suggérant de développer des outils fournissant plusieurs niveaux d'information à des utilisateurs distincts. Ces constats débouchent sur deux recommandations pour l'adaptation des outils de pilotage.

Recommandation 3 : développer des règles de décisions performantes

Dans la plupart des cas étudiés, les outils de pilotage actuels sont fondés sur des acquisitions de données par des capteurs renseignant l'état hydrique du sol, sans règles de décision associées à la prise de données. Des documents formalisant ces règles de décision existent pour certaines espèces, mais pas systématiquement. Cela conduit à l'intégration d'une dose d'empirisme dans l'utilisation des outils par les producteurs et les conseillers. D'autre part, ces règles sont fondées sur un objectif de maintien d'un niveau de disponibilité en eau permettant la maximisation de la production, mais elles n'intègrent pas ou peu les questions des compromis entre rendement et qualité des produits, ou les interactions entre pratiques d'irrigation et risque phytosanitaire. Concernant le lien avec la qualité, des références doivent être acquises pour disposer de règles de décision spécifiques par culture, permettant de moduler la gestion dans l'eau au cours du cycle en fonction d'objectifs variés de quantité et qualité de production. Concernant le lien avec les risques phytosanitaires, les capteurs de pilotage de l'irrigation seuls sont d'une utilité limitée pour l'évaluation des risques. L'humidité du sol, on l'a vu, est une variable qui joue un rôle en épidémiologie, notamment des bioagresseurs telluriques. D'autres outils de mesure, portant sur l'humidité relative de l'air ou sur la durée d'humectation des feuilles, peuvent s'avérer plus pertinent pour la gestion du risque de développement d'inoculum aérien. D'autre part pour un certain nombre de maladies le lien entre irrigation et sensibilité des cultures porte probablement plus sur le mode d'irrigation (goutte à goutte vs aspersion notamment), que sur le calendrier d'irrigation et les doses d'apport. Néanmoins l'intégration de la problématique phytosanitaire dans le pilotage de l'irrigation repose probablement sur l'association de plusieurs types de capteurs, et l'on peut présager le développement futur de solutions logicielles permettant d'associer des informations sur l'état du sol et de l'air pour prédire un risque en fonction de l'épidémiologie des principales maladies des cultures. Enfin, le lien entre fréquence et intensité des irrigations et émission de gaz à effet de serre a été très peu quantifié en cultures légumières irriguées. Il est néanmoins probable que des marges de progrès existent pour limiter les risques de dénitrification, de volatilisation de NH3, et dégagement de N_2O en production légumière irriguée. Beaucoup de situations de lessivages ont été décrites en situation expérimentale ou en conditions de production. **Des efforts sont donc à réaliser concernant l'optimisation des règles de décision par rapport à des objectifs multicritères**. Pour partie, ces travaux sont du ressort des organismes de recherche et des instituts techniques.

Recommandation 4 : adapter les outils à la diversité et aux contraintes

Une des raisons expliquant l'absence d'équipement en outils de pilotage est le nombre de cultures présentes sur l'exploitation : c'est dans les exploitations en production diversifiée (souvent

plus de 10 espèces) que le plus faible taux d'équipement a été observé. En théorie, il conviendrait d'équiper chaque groupe homogène de parcelles cultivées (type de sol x espèce x climat sous abri/plein champ) avec un ensemble de capteurs, mais avec la multiplication des conditions et l'hétérogénéité entre groupes de parcelles les problèmes logistiques (pose et retrait des capteurs, gestion des données) et économiques (coût d'équipement et de main d'œuvre) augmentent. **Plus généralement, la question de la représentativité des parcelles équipées en capteurs est une question qui semble mal approfondie.** Des réflexions devraient être menées pour définir ce qu'est une parcelle représentative, et envisager dans quelle mesure le pilotage à partir d'une parcelle est transposable à d'autres parcelles dont les contextes de production sont légèrement différents (nature du sol, date de plantation, variété, etc…). Dans un certain nombre de situations cependant, on peut penser que la diversité des conditions au sein d'une exploitation rend difficile l'utilisation de capteurs de l'état hydrique du sol. Le développement d'autres outils de décision, par exemple basés sur une mesure de la demande climatique, pourrait être plus adapté. Il a été montré cependant que ces outils sont peu mobilisés en général, quel que soit le nombre de cultures présentes dans les exploitations.

D'autres types de contraintes, liées à un contexte de production particulier (tours d'eau, déplacement du matériel, etc.) peuvent complexifier l'usage d'outils de pilotage. Dans ce cas, le déclenchement de l'irrigation ne dépend pas seulement du statut hydrique du sol et des besoins de la plante, mais aussi de facteurs externes. Des progrès vis-à-vis de l'efficacité de l'irrigation peuvent être attendus, avec une meilleure organisation collective, et une attention accrue à la gestion qualitative de l'eau. **En fonction des contraintes, le choix d'un pilotage par capteurs ou d'autres outils peut sembler légitime**.

Recommandation 5 : favoriser le « dialogue » entre outils et praticiens

Un certain frein à l'évolution technologique attendue des outils de pilotage a été observé. Le développement de solutions d'intégration et de transmission des données n'est souhaité que par une moitié de l'échantillon des personnes intéressées par les outils de pilotage. L'automatisation de l'irrigation est rejetée massivement par les agriculteurs. En revanche le conseil technique est plébiscité. **Il peut survenir un paradoxe entre le principe accepté d'une règle objective de déclenchement de l'irrigation basée sur des mesures, et le rejet de l'idée d'une automatisation de la décision via un ordinateur. Il convient de souligner que l'automatisation des irrigations sur la base de mesures est déjà la règle en cultures hors-sol.** D'autre part, une raisons avancée pour refuser l'automatisation consiste en un questionnement sur la fiabilité des systèmes automatisés. Or l'automatisation permet au contraire, et par principe, d'éviter les erreurs d'appréciation. **C'est probablement davantage la fiabilité des règles de décision associées aux mesures que celle des mesures elles-mêmes qui est remise en question par les agriculteurs et un certain nombre d'acteurs de la filière.** Les moyens pour remédier à cette situation ont été évoqués précédemment. On peut rajouter que, pour une partie des espèces étudiées, les temps entre irrigations sont longs, et le nombre total d'irrigations par cycle de culture peu élevé. Ce constat ne remet pas en cause le principe du pilotage et d'acquisition d'informations intégrées. Mais il offre une possibilité d'échange de ces informations entre le système de mesure et l'agriculteur pour une prise de décision dans un délai de souvent plusieurs heures, voire plusieurs jours. L'agriculteur peut donc dans un certain nombre de cas « garder la main » sur la décision de déclenchement de l'irrigation. L'automatisation

de la décision apparaît plus nécessaire pour des cultures d'été conduites en irrigation localisée, où plusieurs cycles d'arrosage sont réalisés par jour. C'est déjà d'ailleurs le cas depuis longtemps, sous une certaine forme, avec les réseaux munis de programmateurs. L'automatisation pourrait aussi être souhaitable dans le cas de parcellaires complexes, avec plusieurs espèces et des plantations décalées dans le temps, dans un souci d'optimisation des apports. **Au-delà de considérations pratiques, le frein à l'évolution technologique traduit aussi chez certaines personnes interrogées un refus d'évolution lié à une autosatisfaction vis-à-vis de leurs pratiques actuelles, et possiblement une priorité donnée à d'autres aspects de l'itinéraire technique que l'irrigation**.

Conclusion

L'étude menée consistait à apporter des informations sur l'utilisation des outils de pilotage de l'état hydrique du sol, grâce à des enquêtes menées auprès d'entreprises d'agrofourniture, de structures de conseil techniques, d'instituts de recherche-développement, et de producteurs agricoles.

Le principal constat porte sur les progrès substantiels à réaliser concernant l'acquisition et l'utilisation du matériel de pilotage dans certaines filières. Des freins à une large utilisation ont été mis en évidence au cours des enquêtes : manque de connaissances technique tant du côté de certaines structures d'accompagnement que du côté de certains producteurs ; manque de soutien technique pour l'utilisation des outils ; manque de preuves de l'efficience des outils sur l'économie de la ressource en eau et sur les résultats agronomiques.

Le faible développement des outils de pilotage de l'état hydrique du sol relève en premier lieu d'une problématique de développement. Cependant les fabricants continuent d'innover et les outils évoluent vers des systèmes de plus en plus efficaces en ce qui concerne la transmission et la récupération des données, évolutions souhaitées par un certain nombre de producteurs. Au-delà d'une priorité donnée aux actions visant à la diffusion des outils existants, la génération de nouvelles règles de décision passe par des actions de recherche-développement.

Un développement des outils de pilotage ne se fera pas sans une action coordonnée des filières qui permettra d'augmenter le taux d'équipement et d'usage des outils de pilotage. Ceci permettra une meilleure efficience de l'utilisation de l'eau, et limitera les risques de pollution et d'atteintes à l'environnement. L'élaboration de systèmes décisionnels multicritères favorisera l'obtention de meilleurs résultats agronomiques.

Références bibliographiques

Allaire-Leung, S.E., Wu, L., Mitchell, J.P., Sanden, B.L., 2001. Nitrate leaching and soil nitrate content as affected by irrigation uniformity in a carrot field. Agricultural Water Management 48, 37-50.

Bittelli, M., 2011. Measuring soil water content: A review. HortTechnology 21, 293-300.

Bruckler, L., Decockborne, A.M., Renault, P., Claudot, B., 1997. Spatial and temporal variability of nitrate in irrigated salad crops. Irrigation Science 17, 53-61.

Camp, C.R., 1998. Subsurface drip irrigation: A review. Transactions of the Asae 41, 1353-1367.

Castell, J.F., 2006. Fonctionnement hydrique et écophysiologique de la plante, in: Tiercelin, J.R. (Ed.), Traité d'irrigation, 2 ed. Tec&Doc, Paris, p. 1266.

Chanzy, A., Tarussov, A., Judge, A., Bonn, F., 1996. Soil water content determination using a digital ground-penetrating radar. Soil Science Society of America Journal 60, 1318-1326.

Costa, J.M., Ortuno, M.F., Chaves, M.M., 2007. Deficit irrigation as a strategy to save water: Physiology and potential application to horticulture. Journal of Integrative Plant Biology 49, 1421-1434.

De Swaef, T., Steppe, K., 2010. Linking stem diameter variations to sap flow, turgor and water potential in tomato. Funct. Plant Biol. 37, 429-438.

De Tourdonnet, S., Meynard, J.M., Lafolie, F., Roger-Estrade, J., Lagier, J., Sebillotte, M., 2001. Non-uniformity of environmental conditions in greenhouse lettuce production increases the risk of n pollution and lower product quality. Agronomie 21, 297-309.

Dobriyal, P., Qureshi, A., Badola, R., Hussain, S., 2012. A review of the methods available for estimating soil moisture and its implications for water resource management. Journal of Hydrology 458–459, 110-117.

Dukes, M.D., Zotarelli, L., Morgan, K.T., 2010. Use of irrigation technologies for vegetable crops in florida. HortTechnology 20, 133-142.

Ehret, D.L., Lau, A.K., Bittman, S., Lin, W., Shelford, T.J., 2001. Automated monitoring of greenhouse crops. Agronomie 21, 403-414.

Evett, S.R., Steiner, J.L., 1995. Precision of neutron-scattering and capacitance type soil-water content gauges from field calibration. Soil Science Society of America Journal 59, 961-968.

Fabeiro, C., Olalla, F.M.D., De Juan, J.A., 2002a. Production of muskmelon (cucumis melo l.) under controlled deficit irrigation in a semi-arid climate. Agric. Water Manage. 54, 93-105.

Fabeiro, C., Santa Olalla, F.M.D., Juan, J.a.D., 2002b. Production of muskmelon (cucumis melo l.) under controlled deficit irrigation in a semi-arid climate. Agricultural Water Management 54, 93-105.

Farrar, J.J., Nunez, J.J., Davis, R.M., 2000. Influence of soil saturation and temperature on erwinia chrysanthemi soft rot of carrot. Plant Disease 84, 665-668.

Fereres, E., Auxiliadora Soriano, M., 2007. Deficit irrigation for reducing agricultural water use. Journal of Experimental Botany 58, 147-159.

Gallardo, M., Thompson, R.B., Valdez, L.C., Fernandez, M.D., 2006a. Response of stem diameter variations to water stress in greenhouse grown vegetable crops. J. Horticult. Sci. Biotechnol. 81, 483-495.

Gallardo, M., Thompson, R.B., Valdez, L.C., Fernández, M.D., 2006b. Use of stem diameter variations to detect plant water stress in tomato. Irrig Sci 24, 241-255.

Gaudu, J.C., Mathieu, J.M., Fumanal, J.C., Bruckler, L., Chanzy, A., Bertuzzi, P., Stengel, P., Guennelon, R., Others, 1993. Mesure de l'humidité des sols par une méthode capacitive: Analyse des facteurs influençant la mesure. Agronomie 13, 57-73.

Génard, M., Fishman, S., Vercambre, G., Huguet, J.G., Bussi, C., Besset, J., Habib, R., 2001. A biophysical analysis of stem and root diameter variations in woody plants. Plant Physiol 126, 188-202.

Goldhamer, D.A., Fereres, E., 2001. Irrigation scheduling protocols using continuously recorded trunk diameter measurements. Irrig Sci 20, 115-125.

Hanson, B., Peters, D., Orloff, S., 2000a. Effectiveness of tensiometers and electrical resistance sensors varies with soil conditions. California Agriculture 54, 47-50.

Hanson, B.R., Orloff, S., Peters, D., 2000b. Monitoring soil moisture helps refine irrigation management. California Agriculture 54, 38-42.

Hiltunen, L.H., White, J.G., 2002. Cavity spot of carrot (daucus carota). Annals of Applied Biology 141, 201-223.

Intrigliolo, D.S., Castel, J.R., 2004. Continuous measurement of plant and soil water status for irrigation scheduling in plum. Irrig Sci 23, 93-102.

Jones, H.G., 2004. Irrigation scheduling: Advantages and pitfalls of plant-based methods. Journal of Experimental Botany 55, 2427-2436.

Kirda, C., Cetin, M., Dasgan, Y., Topcu, S., Kaman, H., Ekici, B., Derici, M.R., Ozguven, A.I., 2004. Yield response of greenhouse grown tomato to partial root drying and conventional deficit irrigation. Agricultural Water Management 69, 191-201.

Kora, C., Mcdonald, M.R., Boland, G.J., 2005. Epidemiology of sclerotinia rot of carrot caused by sclerotinia sclerotiorum. Canadian Journal of Plant Pathology-Revue Canadienne De Phytopathologie 27, 245-258.

Lecompte, F., 2012. Management of soil nitrate heterogeneity resulting from crop rows in a lettuce–tomato rotation under a greenhouse. Agronomy for Sustainable Development 32, 811-819.

Mccann, I.R., Kincaid, D.C., Wang, D., 1992. Operational characteristics of the watermark model 200 soil water potential sensor for irrigation management. Appl. Eng. Agric. 8, 603-609.

Mitchell, J.P., Shennan, C., Grattan, S.R., May, D.M., 1991. Tomato fruit yields and quality under water deficit and salinity. Journal of the American Society for Horticultural Science 116, 215-221.

Muñoz-Carpena, R., Dukes, M.D., 2014. Automatic irrigation based on soil moisture for vegetable crops.

Muñoz-Carpena, R., Li, Y.C., Klassen, W., Dukes, M.D., 2005. Field comparison of tensiometer and granular matrix sensor automatic drip irrigation on tomato. HortTechnology 15, 584-590.

Romero, R., Muriel, J.L., García, I., Muñoz De La Peña, D., 2012. Research on automatic irrigation control: State of the art and recent results. Agric. Water Manage. 114, 59-66.

Sadras, V.O., 2008. Does partial root-zone drying improve irrigation water productivity in the field? A meta-analysis. Irrig Sci 27, 183-190.

Scherm, H., Bruggen, A., 1995. Comparative study of microclimate and downy mildew development in subsurface drip irrigated and furrow irrigated lettuce fields in california. Plant Disease 79, 620-625.

Schmugge, T.J., Jackson, T.J., Mckim, H.L., 1980. Survey of methods for soil-moisture determination. Water Resour. Res. 16, 961-979.

Schoch, P.G., L'hôtel, J.C., Dauplé, P., Conus, G., Fabre, M.J., 1989. Microvariations de diamètre de tige pour le pilotage de l'irrigation. Agronomie 9, 137-142.

Sepaskhah, A.R., Ahmadi, S.H., 2010. A review on partial root-zone drying irrigation. International Journal of Plant Production 4, 241-258.

Sharma, S.P., Leskovar, D.I., Crosby, K.M., Volder, A., Ibrahim, A.M.H., 2014. Root growth, yield, and fruit quality responses of reticulatus and inodorus melons (cucumis melo l.) to deficit subsurface drip irrigation. Agric. Water Manage. 136, 75-85.

Shock, C.C., Wang, F.X., 2011. Soil water tension, a powerful measurement for productivity and stewardship. HortScience 46, 178-185.

Thompson, R.B., Martinez-Gaitan, C., Gallardo, M., Gimenez, C., Fernandez, M.D., 2007. Identification of irrigation and n management practices that contribute to nitrate leaching loss from an intensive vegetable production system by use of a comprehensive survey. Agricultural Water Management 89, 261-274.

Wang, F., Du, T., Qiu, R., Dong, P., Wang, F., Du, T.S., Qiu, R.J., Dong, P.G., 2010. Effects of deficit irrigation on yield and water use efficiency of tomato in solar greenhouse. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering 26, 46-52.

Wu, B.M., Subbarao, K.V., 2003. Effects of irrigation and tillage on temporal and spatial dynamics of sclerotinia minor sclerotia and lettuce drop incidence. Phytopathology 93, 1572-1580.

Wu, B.M., Subbarao, K.V., 2006. Analyses of lettuce drop incidence and population structure of sclerotinia sclerotiorum and s. Minor. Phytopathology 96, 1322-1329.

Zazueta, F.S., Xin, J., 1994. Soil moisture sensors. Soil Science 73, 391-401.

Zegbe, J.A., Behboudiana, M.H., Clothier, B.E., 2004. Partial rootzone drying is a feasible option for irrigating processing tomatoes. Agricultural Water Management 68, 195-206.

Zotarelli, L., Dukes, M.D., Scholberg, J.M.S., Munoz-Carpena, R., Icerman, J., 2009a. Tomato nitrogen accumulation and fertilizer use efficiency on a sandy soil, as affected by nitrogen rate and irrigation scheduling. Agricultural Water Management 96, 1247-1258.

Zotarelli, L., Scholberg, J.M., Dukes, M.D., Muñoz-Carpena, R., Icerman, J., 2009b. Tomato yield, biomass accumulation, root distribution and irrigation water use efficiency on a sandy soil, as affected by nitrogen rate and irrigation scheduling. Agric. Water Manage. 96, 23-34.

Annexes

Trame entretien enquête conseillers

Trame	***Questions***
A propos du conseiller	**Conseil** sur l'irrigation, dans quelles circonstances ? (en évoquant la fertilisation, les maladies, les désordres physiologiques …) ⇨ directement sollicité sur les questions d'irrigation ou est-ce vous qui en parlez ? ⇨ jusqu'où va le conseil ? (sur le matériel, sur le pilotage, sur la règle de décision…) **Actualité** relative à l'irrigation (matériel d'irrigation, de pilotage, essais sur les règles de décision) ? Si oui : vous en servez-vous pour alimenter votre conseil ? Organisez-vous des **formations** autour de l'irrigation (matériel et pilotage) ? A l'initiative de qui ? Y-a-t-il des essais mis en place chez les producteurs qui ont trait à l'irrigation (dans le sens de l'économie de la ressource) ?
Comportement des producteurs	Quel **type** (par espèces et + ou - diversifié) de producteurs vient s'équiper en matériel d'irrigation (pour l'aspersion, pour le goutte-à-goutte etc.)? Pourquoi selon vous ? IDEM pour le pilotage ?
Spécificités de la région	Quelles sont les spécificités de la région en termes d'irrigation ? Pourquoi ?
Mesures incitatives	De quelle nature pourraient-être selon vous les mesures incitatives à un pilotage plus exigeant de l'irrigation ?

Trame entretien enuqête détaillant de matériel d'irrigation et de pilotage

Thème de la question/Trame	***Question***
Introduction/Degré de spécialisation de la structure	Y-a-t-il un vendeur spécialisé en irrigation ?
Matériel d'irrigation	Quel matériel d'irrigation avez-vous à la vente ? Pourquoi ?
Matériel de pilotage	Matériel de pilotage ? Association matériel d'irrigation et matériel de pilotage ? Comment et pourquoi ? ⇨ Quel matériel le plus conseillé ? Pourquoi ? Règles de décision ? Lesquelles ?
Spécificités de la région	Quelles sont les spécificités de la région en termes d'irrigation ? Pourquoi (type de sol, types de cultures cultivées majoritairement…)?
Comportement des producteurs	Type (par espèces et + ou - diversifié) de producteurs vient s'équiper en matériel d'irrigation (pour l'aspersion, pour le goutte-à-goutte etc.)? Pourquoi selon vous ? IDEM pour le pilotage ? Quels sont les facteurs de choix ? Ordre technique, réglementaire, économique, idéologique…
Flux d'information	Est-ce que vous avez un retour sur la qualité de vos produits ? Si oui comment ? (SAV, réunions avec les commerciaux…)
Connaissances personnelles sur la question de l'irrigation	Quel autre type de matériel d'irrigation et/ou de pilotage connaissez-vous ? ⇨ Si connaissance d'autre type : Pourquoi selon vous ce matériel n'est-il pas en vente ?

Canaux de diffusion	Vous tenez-vous au courant de l'actualité relative à l'irrigation (performances du matériel d'irrigation, nouveau matériel de pilotage...) ? Si oui, comment ?

Trame entretien enquête fabricant de matériel d'irrigation et de pilotage

Thème de la question/Trame	***Question***
Axes de développement	Quels sont les axes prioritaires dans le développement ; ⇨ Pour le matériel d'irrigation ? efficience usage de l'eau, facilité d'utilisation…. ⇨ Pour le matériel de pilotage ? solutions sur les capteurs, ou bien sur la transmission et le traitement de l'information. Avez-vous un service R&D ?
Segmentation du marché	Comment segmentez-vous le marché ? ⇨ Matériel d'irrigation ? spécificités des régions (pédo-climatiques), des cultures….. ⇨ Matériel de pilotage ?
Lien entre le matériel et l'utilisation du matériel	Est-ce qu'il y a un conseil associé avec la vente du matériel d'irrigation ? ⇨ Si oui de quelle nature ? utilisation du matériel (placement sur la parcelle etc.), bon usage de l'eau…
	Est-ce qu'il y a une règle de décision associée à la vente du matériel de pilotage ? ⇨ Si oui comment ? quelles variables (stade de la plante, type de sol…) ?
Circuit du produit	Comment est vendu le matériel ? dans des magasins franchisés, des distributeurs indépendants…

Flux d'information	Par quel type de moyens avez-vous un retour sur la qualité des produits ? ⇨ Si oui comment ? (SAV, réunions avec les commerciaux…)
Mesures incitatives	De quelle nature pourraient-être selon vous les mesures incitatives à un pilotage plus exigeant de la ressource en eau ?

Trame entretien enuqête agents de la R&D

Thème de la question/Trame	***Question***

Orientation des recherches	Avez-vous des essais en place sur l'irrigation ? ⇨ Si oui : dans quel but ? économie d'eau, maladie, qualité des fruits, rendement, lessivage... ⇨ Si oui : sur quoi ? (utilisation du matériel d'irrigation, règles de décision) ⇨ intérêts dans la mise en place de recherches liées à l'irrigation ? Place de l'irrigation dans les expé ?
	Quels sont les thèmes prédominants des recherches que vous menez ? Pourquoi ?
Spécificités de la région	Quelles sont les spécificités de la région en termes d'irrigation ? Pourquoi (type de sol, types de cultures cultivées majoritairement…)?
Connaissances personnelles sur la question de l'irrigation *Canaux de diffusion*	Quel type de matériel de pilotage et d'irrigation connaissez-vous ? ⇨ Pourquoi certain type de matériel ne sont-ils pas largement diffusés dans la région ?
	Vous tenez-vous au courant de l'actualité relative à l'irrigation (performances du matériel d'irrigation, nouveau matériel de pilotage...) ? Si oui, comment ?
Mesures incitatives	De quelle nature pourraient-être selon vous les mesures incitatives à un pilotage plus exigeant de la ressource en eau ?

Questionnnaire à destination des exploitants agricoles

Nom Prénom :
Date :
Localité :

Caractérisation	
Nombre de personnes travaillant sur l'exploitation :	
Circuit de commercialisation :	Objectifs de production :
Cahier des charges :	
Date d'installation :	
Suivi technique :	
Type de sol Profondeur : Drainant/Pas drainant : Taux de MO :	
Type de fertilisation : ferti-irrigation – engrais mx en début de culture – apports de MO	
Rotation	

Espèce	Surface PC	Surface SA	**Type irrigation**
	Total	**Total**	

Type d'accès à l'eau : pompage – forage – retenue collinaire – eau de ville

Diagnostic
Problèmes liés à l'irrigation : -> liés au matériel (bouchage, débit…) : -> sur la culture :
Pensez-vous qu'il y a un lien entre -> irrigation et maladies : -> irrigation et rendement : -> irrigation et qualité : -> irrigation et lessivage :
Matériel de pilotage : Etes vous équipés, avec quoi ? (par le passé ?) -> Si non, connaissez vous le matériel disponible ? -> Si oui, pourquoi ne pas en avoir ?

Prospective
Seriez-vous prêt à investir dans du matériel de pilotage pour travailler l'un des points ? oui / non Avec quel surcoût ? Ordre de prix à l'hectare, à la parcelle < 100 euros/an (100% manuel) < 300 euros / an (semi-automatique) < 500 euros / an (télé transmission) Si données télétransmises (téléphone, mail) : oui / non Si accompagnement/assistance technique pour l'installation et l'interprétation des données : oui / non Si pilotage automatique de l'irrigation (capteurs reliés à des électrovannes) ? oui / non Pourquoi ?
Avez-vous déjà participé à une formation à propos de l'irrigation ? oui / non Quand ? Organisée par qui ?
Seriez-vous intéressé par des journées techniques autour de l'irrigation ? oui / non

Espèce	Durée du cycle	Freq irrig.	Durée des irrig.	Maillage	Débit	Rdt