

Concepts d'efficience et de productivité de l'eau (synthèse bibliographique)

Donkora Kambou ⁽¹⁾, Dimitri Xanthoulis ⁽¹⁾, Korodjouma Ouattara ⁽²⁾, Aurore Degré ⁽³⁾

⁽¹⁾ Univ. Liège- Gembloux Agro-Bio Tech. Unité d'Hydrologie et d'Hydraulique agricole. Passage des Déportés, 2. B-5030 Gembloux (Belgique). E-mail : kdonkora@yahoo.fr

⁽²⁾ Institut de l'Environnement et de Recherches Agricoles-SARIA. BP 10. BF-Koudougou (Burkina Faso).

⁽³⁾ Univ. Liège - Gembloux Agro-Bio Tech. Unité Systèmes Sol-Eau. Passage des Déportés, 2. B-5030 Gembloux (Belgique).

Reçu le 5 avril 2013, accepté le 20 août 2013.

L'efficience et la productivité de l'eau sont des indicateurs utilisés dans de nombreuses disciplines scientifiques, généralement pour rendre compte des pertes en eau qui surviennent au cours de son usage ou des produits générés par unité d'eau consommée. Leur perception est très diversifiée dans la littérature. Mais les définitions les plus partagées présentent l'efficience de l'irrigation comme une mesure de l'efficacité de l'irrigation et l'efficience de la productivité de l'eau comme une mesure de l'efficacité du processus physiologique de production de biomasse et de formation de rendement des cultures, liée à leur consommation réelle en eau. Ainsi, un consensus semble se dégager en faveur de la considération de l'efficience d'application de l'eau (Ea) comme le rapport de l'évapotranspiration réelle à l'eau appliquée à la parcelle et de la productivité de l'eau comme le rapport du rendement à l'évapotranspiration réelle. Le point de divergence réside fondamentalement dans la compréhension des termes constitutifs des expressions de la productivité (PE, Produit/« eau consommée ») et de l'efficience d'application de l'eau (Ea, « eau consommée »/« eau appliquée »). En effet, le terme « eau consommée » est considéré selon les auteurs comme « l'évapotranspiration réelle », « l'irrigation brute plus l'eau de pluie », « l'évapotranspiration plus les eaux perdues à la parcelle mais profitables à d'autres usagers », etc. Par ailleurs, tout en apportant plus de précision sur les concepts d'efficience et de productivité de l'eau, cette revue montre que les facteurs qui affectent ces indicateurs sont peu élucidés. Ainsi, un des axes d'investigation pourrait être la modélisation de l'efficience d'application de l'eau en fonction des pratiques de gestion et de la productivité de l'eau en fonction de la période de mise en place de la culture.

Mots-clés. Utilisation de l'eau, ressource en eau, efficience d'utilisation de l'eau, méthode d'irrigation.

Water efficiency and productivity concepts. A review. Water efficiency and productivity indicators are used in many scientific disciplines, usually to account for water losses that occur during its use, or products generated per unit of water consumed. The interpretation of these indicators is very diverse in the literature. However, the majority of definitions consider water efficiency as a measure of the effectiveness of irrigation, and view water productivity as a measure of the effectiveness of the physiological processes of both biomass production and crop yield formation, linked to the actual consumption of water by the crops. Thus, the consensus seems to be for water application efficiency (Ea) to be considered as the ratio of actual evapotranspiration to the water applied and productivity as the ratio of yield to actual evapotranspiration. The point of divergence relates fundamentally to the understanding of the constituent expressions of productivity (PE, product/"water consumed") and efficiency of water application (Ea, "water consumed"/"applied water"). Indeed, the term "water consumed" is referred to variously by several authors as "actual evapotranspiration", "gross irrigation plus rainfall", "evapotranspiration plus water lost at the plot but beneficial to other users", etc. Furthermore, while providing more details on the concepts of efficiency and water productivity, this review shows that the factors affecting these indicators have not yet been sufficiently elucidated. Thus, one of the axes of investigation could be to model the application efficiency of water firstly, according to water management practices and secondly, in terms of productivity levels in relation to the crop establishment period.

Keywords. Water use, water resources, water use efficiency, irrigation method.

1. INTRODUCTION

La raréfaction des ressources en eau et l'augmentation croissante de leur demande globale, particulièrement dans le secteur agricole qui détient 70 % de la consommation en eau dans le monde (FAO, 2011), nourrit le débat sur la problématique de l'amélioration de l'efficacité d'utilisation et de la productivité de l'eau (van Halsema et al., 2012). Les acteurs du secteur de l'irrigation, notamment les décideurs et les irrigants, ont besoin d'indicateurs sur l'efficacité de l'irrigation et la productivité de l'eau afin de mettre en place des stratégies appropriées de gestion durable des ressources en eau. Cependant, ces concepts sont de plus en plus différemment perçus, entraînant des confusions dans leur appréhension, ce qui complique leur application et exploitation objective et consensuelle (Bluemling et al., 2007 ; Lankford, 2012 ; van Halsema et al., 2012). Le présent article est une revue bibliographique critique sur les approches d'évaluation des indicateurs d'efficacité et de la productivité de l'eau des systèmes irrigués ainsi que les facteurs qui les affectent. L'objectif est de contribuer à apporter plus d'éclairage sur les différents concepts d'efficacité et de productivité de l'eau. À cet effet, la méthodologie de recherche documentaire de Pochet (2005) a été utilisée pour la recherche des références bibliographiques traitant de ces concepts.

La revue bibliographique est assortie de perspectives d'investigation sur les performances de l'irrigation à la parcelle.

2. NOTION DE SYSTÈMES D'IRRIGATION

Les systèmes d'irrigation permettent l'arrosage de superficies aménagées de plus ou moins grandes tailles. Les superficies aménagées peuvent être en maîtrise totale¹ ou partielle² d'eau. Ainsi, selon les pays, des typologies des systèmes d'irrigation généralement basées sur la taille de l'aménagement sont proposées. Lorsque les superficies couvertes par le système d'irrigation permettent d'irriguer plusieurs centaines, voire des milliers d'hectares contigus, on parle de grands aménagements. Par contre, lorsque les superficies couvertes sont de l'ordre de quelques mètres carrés à des centaines d'hectares, on parle de petits et moyens aménagements. Les aménagements peuvent être communautaires ou individuels. Sur les aménagements communautaires, le réseau d'irrigation

est collectif et l'approvisionnement en eau des parcelles se fait suivant le principe du tour d'eau. Les exploitants des aménagements communautaires sont souvent organisés en groupement coopératif. Dans la plupart des cas, les aménagements communautaires sont réalisés par l'État ou des organismes actifs dans le secteur du développement rural. Dans le cas de l'irrigation de surface, ils sont généralement assortis d'un plan de réseau d'irrigation définitif avec des canaux primaires en béton à ciel ouvert ou en tuyauterie enterrée (semi-californien) et des stations de pompages ou des vannes de régulation. Quant aux aménagements de type individuel, ils sont réalisés par les producteurs eux-mêmes, généralement sans aucune étude préalable. Ces aménagements sont installés anarchiquement autour des points d'eau, de façon éparse et les irrigants y travaillent individuellement ou en petits groupements. Ils utilisent des motopompes, des pompes à pédales ou des puisettes qui sont des équipements permettant de pomper ou de puiser l'eau. Les raies, planches et réseaux d'irrigation sont conçus juste pour une campagne de production.

Les systèmes d'irrigation ont été décrits et classés en trois grandes catégories, à savoir l'irrigation de surface, l'irrigation sous pression (qui comprend l'irrigation goutte-à-goutte et l'irrigation par aspersion) et l'irrigation souterraine (Hlaveck, 1992 ; Rieul, 1997 ; Rieul et al., 2003 ; Compaoré, 2006 ; Tiercelin et al., 2006). En s'appuyant sur les descriptions de ces auteurs et bien d'autres, les systèmes d'irrigation et les techniques d'irrigation associées à chacune d'elles sont passés en revue dans le développement ci-dessous.

2.1. L'irrigation de surface

L'irrigation de surface ou irrigation gravitaire est le mode d'irrigation le plus ancien et le plus répandu dans le monde (Rieul, 1997). Elle concerne les techniques d'irrigation pour lesquelles la répartition de l'eau à la parcelle se fait à l'air libre et par simple écoulement à la surface du sol (Compaoré, 2006). Les techniques d'irrigation de surface comprennent l'irrigation par planche, l'irrigation par submersion, l'irrigation à la raie et l'irrigation de surface mixte. Elles se distinguent par la méthode d'application de l'eau, qui peut être par ruissellement ou par submersion.

Les techniques d'irrigation de surface entraîneraient un apport excessif d'eau. L'irrigation par submersion engendrerait, par exemple, l'utilisation de plus de 2000 t d'eau pour produire 1 t de riz, alors que le riz n'a besoin que de 800 t d'eau pour ses propres besoins physiologiques (Lage et al., 2004). Une grande partie de cette eau serait perdue par infiltration et percolation. Walker (1999) a montré que la culture du riz dans les rizières avec diguettes permanentes engendre des pertes importantes d'eau par infiltration latérale

¹ L'approvisionnement en eau des cultures est assuré selon un programme défini par l'irrigant et/ou les gestionnaires de l'aménagement.

² L'approvisionnement en eau des cultures est assuré par le ruissellement des eaux de pluies, comme dans la riziculture pluviale.

dans la digue et à partir de là, verticalement vers les eaux souterraines. Dans plusieurs pays rizicoles, l'efficacité de l'irrigation est faible et varie entre 25 et 48 % (Walker, 1999 ; Lage et al., 2004). La cause majeure de cette faible efficacité est due aux pertes élevées en infiltration latérale, qui s'accroissent avec l'augmentation de la hauteur de la lame d'eau dans la parcelle du riz. Ces pertes peuvent être minimisées par la réduction de la hauteur de la lame d'eau dans les diguettes, à un niveau inférieur à 5 cm (Walker et al., 1986 ; Lage et al., 2004).

Pour réduire les pertes dans l'irrigation de surface, des améliorations ont été introduites à l'aide de dispositifs mécaniques qui permettent de mieux contrôler la répartition de l'eau en tête de parcelle et les débits délivrés dans les raies ou sur les planches et dans les bassins. Ce sont notamment les siphons, les gaines souples, les tubes à vannettes, les systèmes dits « californiens » et les dispositifs automatiques appelés « transirrigation » pour ce qui concerne l'irrigation à la raie. Au niveau des planches et bassins, les améliorations portent sur l'étanchéité du canal qui distribue l'eau en tête de parcelle et à son équipement en vannes de régulation qui permettent d'alimenter successivement les biefs de ce canal, et de vannes de prises latérales qui alimentent les planches ou bassins. Avec l'association de ces techniques, les rendements hydrauliques de l'irrigation de surface peuvent passer de moins de 50 % en irrigation traditionnelle à 70-80 % en irrigation modernisée (Rieul, 1997).

2.2. L'irrigation sous pression

L'irrigation sous pression nécessite la mise en pression préalable de l'eau. Les techniques d'irrigation sous pression comprennent l'aspersion, qui est une imitation de la pluie et la micro-irrigation, qui permet de livrer l'eau et les fertilisants directement au pied de la plante. Ces deux techniques permettent d'apporter aux cultures les quantités d'eau qui cadrent avec leur besoin sans engendrer de pertes importantes. Les efficacités hydrauliques en irrigation sous pression sont de l'ordre de 90 à 95 % (Rieul, 1997 ; Compaoré, 2006). Il convient de noter qu'il s'agit ici en réalité des rendements hydrauliques qui mettent plus l'accent sur l'efficacité du système à convoier l'eau depuis le dispositif de pompage jusqu'au champ. En effet, les rendements hydrauliques ne s'intéressent pas au devenir de l'eau livrée à la parcelle, notamment les pertes par dérive et par évaporation qui peuvent être importantes selon les conditions météorologiques, particulièrement en irrigation par aspersion et la consommation réelle de l'eau par les cultures par rapport au volume livré à la parcelle. Les nuances liées à la notion d'efficacité sont discutées plus amplement dans la section (3).

En plus des bons rendements hydrauliques, les techniques d'irrigation sous pression permettent un travail du sol sans nivellement. Cependant, elles sont relativement plus coûteuses par rapport à la technique d'irrigation de surface.

2.3. L'irrigation souterraine

L'irrigation souterraine serait un des ancêtres de la micro-irrigation (Hlaveck, 1992). Désignée sous le vocable de « subirrigation » dans les pays anglo-saxons, cette technique consiste à recharger une nappe par injection d'eau dans le sol en utilisant un réseau de drains enterrés ou, plus rarement, un réseau de fossés (Chossat et al., 2006). Une autre technique proche de l'irrigation souterraine est l'irrigation souterraine par tuyaux poreux, qui se caractérise par un apport d'eau à l'aide de conduites poreuses disposées à faible profondeur. Cette technique utilise le processus de diffusion capillaire pour assurer les transferts hydriques depuis les tuyaux jusqu'au système racinaire.

L'application de cette technique exige l'abondance des ressources en eau et la présence soit d'une nappe souterraine permanente, soit d'une nappe perchée temporaire. La technique requiert également des sols hydromorphes, perméables et à topographie plane. Sa mise en œuvre nécessite l'installation de dispositifs expérimentaux représentatifs, répartis sur les sites à exploiter.

D'après des mesures effectuées dans le Médoc par Chossat et al. (1987), les apports d'eau à l'aide de la technique d'irrigation souterraine correspondaient entre 2,7 à 3 fois l'évapotranspiration potentielle (ETP), avec des pertes latérales importantes. Compaoré (2006) pense que cette modeste efficacité de la technique d'irrigation souterraine, dans un contexte de ressources en eau de plus en plus sollicitées et donc de plus en plus limitées, contribuera à réduire sa généralisation dans l'avenir.

En termes d'avantage, le niveau d'investissement pour la technique d'irrigation souterraine est plus modeste que celui des techniques d'irrigation par aspersion et goutte-à-goutte. Par ailleurs, il n'y a pratiquement pas de perte par ruissellement et évaporation. Enfin, dans le cas d'un réseau de drains enterrés, la technique ne gêne en rien la circulation des engins agricoles.

Les technologies d'irrigation, telles que décrites précédemment, affectent les efficacités de l'irrigation. En outre, les performances techniques et productives de l'irrigation peuvent aussi être affectées par les capacités techniques et organisationnelles des irrigants et gestionnaires des périmètres irrigués (IWMI, 1997 ; Wellens et al., 2009). Par ailleurs, le choix d'un système d'irrigation est délicat et doit tenir compte d'un certain nombre de paramètres, dont la disponibilité et la

qualité des ressources en terre et en eau, les exigences financières et techniques du système d'irrigation et son aptitude à assurer convenablement l'irrigation de la culture à exploiter (Hlavec, 1992).

3. NOTION D'EFFICIENCE ET DE PRODUCTIVITÉ DE L'EAU AGRICOLE

La notion d'efficacité de l'irrigation, qui se résumait encore au rapport de l'eau consommée dans la zone racinaire à celle appliquée (Israelsen et al., 1944³ cité par van Halsema et al., 2012 ; Israelsen, 1950⁴ cité par van Halsema et al., 2012) avant la deuxième guerre mondiale est devenue, dans les années 1950, un facteur utilisé dans l'ingénierie pour la conception et l'opérationnalisation des technologies d'irrigation (van Halsema et al., 2012). À partir des années 1990, le concept d'efficacité s'est élargi aux études de performances technique et économique de l'irrigation et de comptabilité de l'eau à l'échelle de la ressource en eau, intégrant la notion de productivité (Lankford, 2012). De nos jours, le concept d'efficacité est diversement perçu et utilisé aussi bien dans le domaine de l'irrigation que dans d'autres disciplines scientifiques, entraînant parfois des confusions qui compliquent leur application (van Halsema et al., 2011). Nous passons ici en revue les principales acceptations de la notion d'efficacité.

3.1. Conception traditionnelle de l'efficacité de l'irrigation

La conception de l'efficacité d'irrigation, définie comme le rapport :

$$EI = \frac{\text{Eau utilisée avantageusement}}{\text{Eau totale appliquée}} \quad (\text{Éq. 1})$$

est le concept traditionnel de l'efficacité d'irrigation du génie hydraulique (van Halsema et al., 2012). Cette perception de l'efficacité met l'accent sur la quantité d'eau libérée à partir d'une source et la consommation réelle d'eau par les cultures. Un intérêt spécifique a été porté sur les phénomènes de déperdition d'eau qui surviennent au cours du transport de l'eau, de sa source à la parcelle, afin de définir l'aptitude du système de

transport à assurer le transport de l'eau sans perte, conduisant à la notion d'efficacité de transport ou efficacité du réseau (Bos et al., 1990 ; Perry, 2007). En considérant séparément les événements qui se passent à la parcelle ou au champ et ceux qui se passent au cours du transport de l'eau, il apparaît dans le concept d'efficacité de l'irrigation deux sous-concepts :

- l'efficacité de transport (E_t), qui traduit la performance de la technologie (Brouwer et al., 1989 ; van Halsema, 2002 ; van Halsema et al., 2012). Les fourchettes d'efficacité généralement utilisées pour caler les débits à libérer à la source selon la technique d'irrigation sont de l'ordre de $30 < EI < 70$ en irrigation de surface et $70 < EI < 90$ en irrigation sous pression (van Halsema et al., 2012),
- l'efficacité d'application (E_a), qui s'intéresse aux phénomènes de flux d'eau à la parcelle, est généralement définie comme le rapport entre l'eau consommée (E_c), « eau utilisée avantageusement par la plante » (Van Halsema et al., 2012) et l'eau effectivement appliquée à la parcelle (E_l) et s'exprime par :

$$E_a = \frac{E_c}{E_l} \quad (\text{Éq. 2})$$

Les efficacités qui découlent de cette expression dépendent de la compréhension qu'on donne à eau « utilisée avantageusement » (Keller et al., 1995 ; Burt et al., 1997). En effet, certains auteurs proposent qu'il s'agit de l'évapotranspiration réelle de la plante (ETR) (Rao, 1993 ; van Halsema et al., 2011 ; van Halsema et al., 2012) et d'autres suggèrent la prise en compte des eaux supposées perdues à la parcelle, mais « profitables à d'autres utilisateurs » (Lankford, 2012). Pour Burt et al. (1997), le terme E_l du dénominateur doit correspondre à la différence entre le volume d'eau d'irrigation (VE_i) et le stock d'eau d'irrigation (ΔS_i) soit $E_l = VE_i - \Delta S_i$, ce qui revient à considérer au dénominateur toutes les « pertes » (évapotranspiration, percolation, ruissellement).

Dans le domaine de l'irrigation, cet indicateur (E_a) est défini pour fournir une idée sur l'adéquation des arrosages par rapport aux besoins effectifs en eau des cultures, mais ne considère pas les événements qui se passent de la source d'eau au champ ni des réutilisations possibles des eaux non valorisées à la parcelle par la plante. Il découle d'une logique d'optimisation des processus technologiques. Ainsi, dans la conception de l'efficacité classique, le terme du numérateur devrait correspondre à l'évapotranspiration réelle de la plante, comme le soutiennent van Halsema et al. (2012). Par ailleurs, considérant que dans la pratique les efficacités d'irrigation sont définies à l'échelle d'un système d'irrigation, pour mesurer son aptitude à convoyer

³ Israelsen O.W., 1950. *Irrigation principles and practices*. New York, NY, USA: Wiley.

⁴ Israelsen O.W., Criddle W.D., Furiman D.K. & Hansen V.E., 1944. *Water application efficiencies in irrigation*. Agricultural Experiment Station Bulletin, 311. Logan, UT, USA: Utah State Agricultural College.

l'eau sans perte et à en faire un usage productif, van Halsema et al. (2012) suggèrent de limiter l'usage de ces indicateurs à leurs éléments constitutifs que sont l'efficacité de transport (primaire, secondaire, tertiaire) et l'efficacité d'application (parcelle, exploitation). Ainsi, la notion d'efficacité avec ses deux termes (Ea et Et) est présentée comme l'efficacité globale de l'irrigation (EG) et s'exprime par :

$$EG = Ea \times Et \quad (\text{Éq. 3}).$$

3.2. Concepts de productivité (PE) et d'efficacité d'utilisation de l'eau (EUE)

La productivité de l'eau (PE) a longtemps été définie comme le rendement des cultures par unité de transpiration (Viets, 1962). Dans son acception actuelle, la notion de productivité de l'eau dans le secteur de l'irrigation se fonde sur l'idée de « Produire plus de grains par goutte d'eau » (FAO, 2002 ; Giordano et al., 2006). Il s'agit d'une mesure de l'accroissement des productions par unité d'eau consommée et s'exprime par :

$$PE = \frac{P}{Ec} \quad (\text{Éq. 4})$$

avec PE, Productivité en $\text{kg} \cdot \text{mm}^{-1} \cdot \text{ha}^{-1}$; P, Produit en kg ; Ec, Eau consommée, correspondant à l'évapotranspiration réelle par unité de surface en mm ou m^3 .

Mais des divergences et des nuances apparaissent dans la compréhension des termes « produit » du numérateur et « eau consommée » du dénominateur dans l'expression de la productivité. En effet, certains auteurs comprennent par « eau consommée », eau livrée, eau appliquée, eau disponible, etc., ce qui entraîne naturellement une confusion dans l'appréhension de la notion de productivité (van Halsema et al., 2012). D'autres auteurs (IWMI, 1997 ; Dembélé et al., 2001) présentent l'indicateur de la productivité de l'eau (PE) comme le rapport de la production (P) au volume d'eau reçu (V_e) pour l'irrigation de la parcelle :

$$PE = \frac{P}{V_e} \quad (\text{Éq. 5}).$$

Des auteurs comme Playan et al. (2006) pensent même que d'autres indicateurs de productivité peuvent être dérivés de l'Éq. 4, en faisant varier le « dénominateur » qui peut correspondre à : « Eau fournie » (irrigation + pluie) ; « Besoins bruts d'irrigation » (Évapotranspiration + besoins de lessivage), etc. Dans ces conditions, il devient difficile de comparer des valeurs de productivité, les bases de

calcul utilisant des variables fondamentalement différentes. Par ailleurs, au niveau du numérateur, les agro-économistes qui perçoivent la productivité sous l'angle de la valorisation économique de l'eau, préfèrent remplacer le terme « produit » par sa valeur monétaire. Ils l'expriment comme le rapport de la valeur ajoutée du produit (VA), ou encore du revenu (R) au volume d'eau consommée pendant tout le cycle de production. Cette approche permet d'appréhender le produit financier généré par mètre cube d'eau (Bouaziz et al., 2002), mais occulte du même coup les aspects liés à la quantité de biomasse produite par unité d'eau consommée. Une autre confusion découle de la perception de la notion d'efficacité d'utilisation de l'eau (EUE). L'efficacité d'utilisation de l'eau (EUE en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$) est généralement définie par :

$$EUE = \frac{\text{production (kg)}}{\text{eau appliquée ou disponible (m}^3\text{)}} \quad (\text{Éq. 6})$$

(van Halsema et al., 2012).

Dans cette expression, le dénominateur [eau appliquée ou eau disponible] est généralement considéré comme l'eau d'irrigation majorée des eaux de pluie. L'eau appliquée dans cette logique correspond à la quantité d'eau brute disponible à la parcelle ou au champ. De cette eau, une portion indéterminée équivalant à l'évapotranspiration réelle de la culture (ETR) est utilisée pour la production de biomasse par la plante. Cette notion prend en compte la nécessité de maximiser la production par unité d'eau disponible dans un contexte de demande alimentaire croissante et de ressources en eau limitées (Molden et al., 2010). Mais la confusion vient du fait que les phyto-physiologistes présentent l'efficacité d'utilisation de l'eau (EUE), qui est un paramètre clé pour déterminer l'efficacité avec laquelle le secteur agricole utilise l'eau, comme le rapport du gain de carbone (GC en kg) par unité d'eau utilisée (EU en m^3) (Flexas et al., 2010) :

$$EUE (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}) = \frac{GC}{EU} \quad (\text{Éq. 7}).$$

En fonction des variables associées aux termes « Gain de carbone » et « Eau utilisée », Flexas et al. (2010) distinguent plusieurs types d'efficacité d'utilisation de l'eau, définies ci-après, qui sont interdépendantes et se confondent parfois à la notion de productivité de l'eau.

Efficacité d'utilisation de l'eau par la culture (EUEc). Cette efficacité (EUEc) dépend de l'eau totale utilisée au cours du cycle de production de la

culture, qui comprend l'eau perdue et non utilisée par la plante (évaporation, ruissellement, infiltration, etc.) et l'eau transpirée par la plante. Elle est définie comme le rapport du gain total de carbone par la plante (GTC en kg) à l'eau totale utilisée (ETU en m³) :

$$EUEc \text{ (kg}\cdot\text{m}^{-3}\text{)} = \frac{GTC}{ETU} \quad (\text{Éq. 8}).$$

Efficienc e d'utilisation de l'eau par la plante entière (UEp). Elle prend seulement en compte l'eau utilisée par la plante (eau transpirée par la plante) et s'exprime par :

$$EUEp \text{ (kg}\cdot\text{m}^{-3}\text{)} = \frac{GTC}{Tr} \quad (\text{Éq. 9}).$$

Cette efficacité apprécie le gain total de carbone (GTC) de la plante par rapport à sa consommation en eau, traduite par sa transpiration (Tr en m³). La transpiration de la plante dépend de paramètres liés à sa croissance et à la structure de son couvert végétal, notamment l'indice de la surface foliaire et l'angle des feuilles qui déterminent le niveau d'interception de la lumière utilisée sous forme d'énergie pour la transpiration au niveau de la feuille. La transpiration foliaire elle-même dépend de la demande évaporative de l'atmosphère, représentée par le déficit de pression de vapeur de la feuille à l'air (DPV) et de la conductance de la feuille, surtout de la conductance stomatique (Cs). Selon Barbour et al. (2010), la conductance du mésophylle, (Cm) est une limite importante et variable de la photosynthèse qui affecte également l'efficacité de la transpiration foliaire. Ces auteurs soutiennent qu'une variation significative de Cm a été trouvée entre des génotypes différents et a été corrélée avec le taux de photosynthèse. Le génotype avec la Cm la plus élevée présenterait également la transpiration la plus élevée.

À partir de l'évaluation du gain net de carbone (GNC) [différence entre le gain de carbone par photosynthèse et les pertes de carbone par respiration], de la conductance stomatique (Cs) et du déficit de pression de vapeur de la feuille à l'air (DPV), Flexas et al. (2010) distinguent l'efficacité d'utilisation de l'eau à l'échelle de la feuille et l'efficacité intrinsèque d'utilisation de l'eau.

Efficienc e d'utilisation de l'eau à l'échelle de la feuille. Elle s'exprime par le rapport du gain net de carbone (GNC) à la transpiration foliaire (Tr) :

$$EUEf \text{ (kg}\cdot\text{m}^{-3}\text{)} = \frac{GNC}{Tr} \quad (\text{Éq. 10}).$$

Efficienc e intrinsèque d'utilisation de l'eau. Elle est définie par le rapport du gain net de carbone (GNC) [différence entre le gain de carbone de la photosynthèse et les pertes de carbone par respiration] à la conductance stomatique (Cs) :

$$EUEi \text{ (kg}\cdot\text{m}^{-3}\text{)} = \frac{GNC}{Cs} \quad (\text{Éq. 11}).$$

Enfin, considérant le rendement (en fruit de la culture de vigne), Flexas et al. (2010) définissent le rendement de l'efficacité d'utilisation de l'eau (EUEr). Ce rendement ne considère que le bilan de carbone des fruits de vigne et s'exprime par le rapport du rendement en fruit (Rdt en kg·ha⁻¹) à la transpiration (Tr en m³) :

$$EUEr \text{ (kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}\text{)} = \frac{Rdt}{Tr} \quad (\text{Éq. 12}).$$

Dans ce dernier cas, le rendement de l'efficacité d'utilisation de l'eau (Éq. 12) semble s'assimiler à la notion de productivité de l'eau (Sadras et al., 2006 ; Bluemling et al., 2007).

Un autre indicateur d'efficacité qui fait polémique dans la littérature est l'approvisionnement relatif en eau (ARE), qui s'exprime par :

$$ARE = \frac{\text{Volume d'eau disponible}}{\text{Besoins réels en eau des cultures}} \quad (\text{Éq. 13})$$

(Rodriguez-Diaz et al., 2008 ; van Halsema et al., 2012).

Dans cette expression, les besoins réels en eau de la culture correspondent à l'évapotranspiration réelle de la culture. Si ARE = 1, cela signifie qu'il y a adéquation entre l'eau disponible et la consommation d'eau par la culture. Pour le calcul de ARE, l'IWMI (1997) introduit dans son expression au dénominateur l'évapotranspiration (ET) et les eaux perdues par percolation profonde (PP) et considère au numérateur les pluies efficaces (pef) et l'irrigation (Ir), ce qui donne :

$$ARE = \frac{Ir + pef}{ET + PP} \quad (\text{Éq. 14}).$$

Cette expression a été utilisée par Dembélé et al. (2001) dans l'évaluation des performances à la parcelle de périmètres irrigués au Burkina Faso. En réalité, les

eaux de percolation n'intervenant plus dans le processus de production de la plante ne devraient pas être prises en compte ; autrement dit, on aurait alors dû prendre en compte aussi bien les eaux perdues par ruissellement (colature), voire les eaux de lessivage.

Au regard de ces confusions, il est opportun de convenir des variables à utiliser pour ces concepts, afin de garantir leur compréhension et usage harmonisé et permettre à leurs utilisateurs de parler le même langage. Dans cet esprit, considérant que la notion de productivité mesure l'efficacité du processus physiologique de production de biomasse et de formation de rendement des cultures, lié à leur consommation réelle en eau, de nombreux auteurs (Rao, 1993 ; Lage et al., 2004 ; van Halsema et al., 2012) suggèrent de s'en tenir à l'Éq.4 comme expression de la productivité. Exprimée de la sorte, elle a aussi l'avantage de pouvoir être comparée dans l'espace et dans le temps pour le même type de culture (Sadras et al., 2006). En ce qui concerne l'efficience d'utilisation de l'eau, pour marquer la différence entre EUE et PE, van Halsema et al. (2012) pensent que EUE devrait être réservée pour les applications d'eau brute. Du reste, ils considèrent que EUE est plutôt une mesure de l'efficacité de l'irrigation et non un indicateur de productivité.

Au niveau de la perception économique, la valeur ajoutée par mètre cube d'eau consommé est un indicateur intéressant, en ce sens qu'il peut permettre de cibler des cultures économiquement rentables, mais il reste un indicateur très sensible aux aléas du marché, avec des éventualités de variations importantes en fonction des espaces géographiques.

Le **tableau 1** reprend les composantes des fractions des indicateurs de productivité et d'efficience de l'eau.

Tableau 1. Résumé de quelques acceptations des notions d'efficience et de productivité de l'eau — *Summary of some senses of water efficiency and productivity concepts.*

N° des colonnes	1	2	3	4	5	6	7
	N° des lignes						
1	→	P ou Rdt	GTC	GNC	ETR ou ETR + PP	Ir + Pef	Références
	↓ Variables						
2	Tr	$EUE_c = P/Tr$	$EUE_p = GTC/Tr$	$EUE_t = GNC/Tr$			Flexas et al., 2010
3	ETU	$PE = P/ETU$	$EUE_c = GTC/ETU$				(3 ; 2) Playán et al., 2006 (3 ; 3) Flexas et al., 2010
4	ETR	$PE = P/ETR$					van Halsema et al., 2012
5	ETR + PP					$ARE = Ir + pef/ETR + PP$	IWMI, 1997 ; Dembélé et al., 2002
6	Cs		$EUEi = GNC/Cs$				Flexas et al., 2010
7	EI	$PE = P/E_i$			$Ea_1 = ETR/E_i$ $Ea_2 = ETR + PP/E_i$		(7 ; 5) pour Ea_1 : Rao, 1993 ; van Halsema et al., 2012 ; (7 ; 5) pour Ea_2 : Lankford, 2012

Source : synthèse de l'auteur à partir de la revue bibliographique (la colonne 7 donne quelques références d'articles traitant des concepts d'efficience et de productivité de l'eau) — *Summary of author from the literature review (column 7 gives some references to articles dealing with efficiency and water productivity concepts)* ; ARE : approvisionnement relatif en eau — *relative water supply* ; Cs : Conductance stomatique — *stomatal conductance* ; Ea : efficience d'application — *application efficiency* ; EI : efficience de l'irrigation — *irrigation efficiency* ; E_i : eau appliquée — *water applied* ; ETR : évapotranspiration réelle — *actual evapotranspiration* ; EUE_c : efficience d'utilisation de l'eau par la culture — *crop water use efficiency* ; EUE_p : efficience d'utilisation de l'eau à l'échelle de la feuille — *leaf-level water use efficiency* ; EUE_t : efficience intrinsèque d'utilisation de l'eau — *intrinsic water use efficiency* ; $EUEp$: efficience d'utilisation de l'eau par la plante entière — *whole-plant water use efficiency* ; $EUEi$: rendement de l'efficience d'utilisation de l'eau — *yield water use efficiency* ; ETU : eau totale utilisée — *total water use* ; GNC : gain net de carbone — *net carbon gain* ; GTC : gain total de carbone — *total carbon gain* ; Ir : irrigation — *irrigation* ; P : production — *production* ; PE : productivité de l'eau — *water productivity* ; Pef : pluie efficace — *effective rainfall* ; PP : perte par percolation profonde — *loss by deep percolation* ; Rdt : rendement — *yield* ; Tr : transpiration — *transpiration*.

4. APPROCHES DE CALCUL DES PRINCIPAUX INDICATEURS DE PERFORMANCE À LA PARCELLE

Pour apprécier les performances de l'irrigation à la parcelle, deux indicateurs sont généralement utilisés : l'uniformité de distribution (UD) et l'efficacité d'application (Ea).

4.1. Cas de l'irrigation de surface

Dans cette sous-section, l'approche de calcul de l'uniformité de distribution, le coefficient de stockage et l'efficacité d'application de l'eau à la parcelle seront abordés.

Uniformité de distribution (UD). L'une des qualités majeures de l'irrigation est d'obtenir la plus grande régularité de la dose d'arrosage sur toute la parcelle, ce qui se traduit par l'uniformité de distribution. Elle indique la qualité de la répartition de la hauteur d'eau infiltrée dans la parcelle et s'exprime par :

$$UD = 100 \times \frac{\text{HME infiltrée dans les 25 \% de la surface la moins irriguée}}{\text{HME infiltrée dans la parcelle}} \quad (\text{Éq. 15})$$

avec HME, hauteur moyenne d'eau d'irrigation.

La hauteur moyenne d'eau infiltrée dans les 25 % de la surface la moins irriguée est définie comme étant la moyenne des 25 % des valeurs les plus basses de la hauteur d'eau infiltrée. Ainsi, l'uniformité de distribution dépend des paramètres qui caractérisent le système d'irrigation et son mode de gestion, notamment l'approvisionnement en eau de la parcelle (réseau, débit, temps d'irrigation), la qualité de l'aménagement parcellaire (dimensionnement des planches, raies ou bassins et les pentes, etc.), et les caractéristiques hydrodynamiques du sol qui influencent les vitesses d'écoulement de l'eau (écoulements de surface et souterrain). Elle peut être exprimée en fonction des variables qui la caractérisent (Pereira et al., 2006) :

$$UD = f_1(Q, L, n, So, Ic, Fa, Tco) \quad (\text{Éq. 16})$$

avec Q, débit d'alimentation ; L, longueur de la raie, de la planche ou du bassin ; n, coefficient de rugosité hydraulique ; So, pente longitudinale de la parcelle ; Ic, caractéristiques d'infiltration du sol ; Fa, caractéristique de la section transversale de la raie, de la planche ou du bassin ; Tco, temps écoulé jusqu'à l'interruption de l'irrigation.

L'uniformité de distribution est une condition nécessaire pour l'efficacité d'une irrigation. Toutefois,

elle n'est pas suffisante pour apprécier la qualité de l'arrosage car on peut avoir une irrigation très uniforme mais avec une très faible efficacité d'application (Bouaziz et al., 2002).

Coefficient de stockage (CoS). Le coefficient de stockage est également un paramètre d'appréciation de la qualité de l'irrigation de surface. Il représente le pourcentage du déficit hydrique du sol comblé par l'irrigation (Bouaziz et al., 2002) :

$$CoS = \frac{\text{HME stockée dans la zone racinaire}}{\text{Déficit hydrique du sol comblé par l'irrigation}} \times 100 \quad (\text{Éq. 17})$$

Efficacité d'application. En ce qui concerne la détermination de l'efficacité d'application de l'eau à la parcelle, qui s'exprime couramment comme le rapport entre la quantité d'eau réellement stockée dans la zone racinaire et la quantité apportée au niveau du champ (Pereira et al., 2006), différentes approches, inspirées de l'Éq. 2, ont été proposées :

Approche de Merriam et Keller. Dans leur approche, Merriam et al. (1978) estiment l'efficacité d'application de l'eau à la

parcelle à partir de la dose moyenne appliquée (\bar{D}_a), la dose minimale moyenne infiltrée ($\bar{D}_{\text{inf, min}}$) et le déficit hydrique du sol avant l'irrigation (DH), à partir de deux alternatives. Dans la première alternative, le déficit en humidité du sol est comblé par l'irrigation, mais tout excès d'eau est perdu par percolation :

$$\text{Si } \bar{D}_{\text{inf, min}} < DH, \text{ alors } EAmk = \frac{\bar{D}_{\text{inf, min}}}{\bar{D}_a} \times 100 \quad (\text{Éq. 18})$$

Pour l'autre alternative, l'eau appliquée est destinée à réalimenter la zone racinaire sans que le déficit hydrique du sol ne soit comblé par l'irrigation :

$$\text{Si } \bar{D}_{\text{inf, min}} > DH, \text{ alors } EAmk = \frac{DH}{\bar{D}_a} \times 100 \quad (\text{Éq. 19})$$

La complexité de cette approche réside dans la détermination du déficit hydrique du sol et de la dose moyenne infiltrée et les précisions dans les applications d'eau.

Approche de Elliot et Walker. Le calcul de l'efficacité d'application à la parcelle dans l'approche de Elliot et al. (1982) est bâtie sur le rapport entre la dose moyenne

efficace infiltrée (\bar{D}_{eff}) et la dose moyenne appliquée (\bar{D}_a) :

$$EA_{ew} = \frac{\bar{D}_{eff}}{\bar{D}_a} \times 100 \quad (\text{Éq. 20}).$$

Cette expression tient compte de la dose effectivement stockée dans la zone racinaire utile pour la plante et sa complexité relative réside également dans la détermination de la dose moyenne infiltrée.

Approche de Walker. Walker (1989) suggère la prise en compte de la dose infiltrée requise par unité de longueur à travers la formule suivante :

$$EA_w = \frac{Z_{req} \times L}{Q_0 \times 60 \times t_{co}} \quad (\text{Éq. 21})$$

où L est la longueur des raies en m ; t_{co} est le temps de coupure en min ; Z_{req} est la dose d'eau infiltrée requise en $m^3 \cdot m^{-1}$ de raie ; Q_0 est le débit entrant dans la raie en $m^3 \cdot h^{-1}$.

Cette approche apporte, certes, plus de précision dans l'estimation de l'efficacité mais requiert beaucoup plus de variables à déterminer. Elle est indiquée pour l'irrigation de surface à la raie.

Approche de Molden. En 1990, Molden et Gates présentent l'efficacité d'application à la parcelle comme le désir de conserver l'eau en égalant l'eau livrée avec l'eau requise par la culture. L'efficacité est ainsi exprimée comme la moyenne, pour une certaine zone (z_r) et pour la durée d'une campagne de suivi (CaS), du rapport entre le volume requis (Q_R) et le volume livré (Q_D) :

$$\text{Pour } Q_D \geq Q_R, \text{ alors } EAm = \frac{1}{CaS} \sum_T \left(\frac{1}{z_r} \sum_{z_r} \left(\frac{Q_R}{Q_D} \right) \right);$$

sinon $EAm = 1$ (Éq. 22).

Cette approche nécessite un suivi continu du profil d'humidité dans le sol tout au long du cycle de la culture ainsi que des applications d'eau.

Au regard de la diversité des approches d'appréhension de l'efficacité d'application et des difficultés à déterminer correctement certaines variables, Bos et al. (1990), se basant sur les concepts classiques de l'efficacité, ont soutenu la perception de l'efficacité d'application de la Commission Internationale de l'Irrigation et du Drainage pour qui l'efficacité d'application à la parcelle est la

relation entre la quantité d'eau fournie au champ et la quantité d'eau nécessaire et mise à disposition pour l'évapotranspiration de la culture afin d'éviter un stress hydrique pendant le cycle de croissance, ce qui se résume à l'Éq. 2. La connaissance de l'efficacité d'application de l'eau à la parcelle permet de déduire le pourcentage des pertes d'eau (PPE) d'irrigation dans une planche, représenté par :

$$PPE = 100 - Ea. \quad (\text{Éq. 23}).$$

Ce pourcentage représente la somme des pertes par percolation profonde (PP en %) et par ruissellement vers la colature (Rc en %). Le calcul de la valeur de PP requiert la détermination du volume d'eau infiltré à la fin de l'irrigation (V_i en m^3), le volume d'eau stocké dans la zone racinaire (V_s en m^3), le temps d'irrigation (T_i en min) et le débit d'alimentation (Q en $m^3 \cdot \text{min}^{-1}$). À partir de ces variables, PP peut être déterminé par l'équation :

$$PP = \frac{(V_i - V_s) \times 100}{Q \times T_i} \quad (\text{Éq. 24}).$$

Ainsi, en remplaçant dans l'Éq. 23, PPE par ses éléments constitutifs, on obtient :

$$PPE = 100 - Ea \Leftrightarrow PP + Rc = 100 - Ea$$

d'où $Rc = 100 - Ea - PP$ (Éq. 25).

4.2. Cas de l'irrigation par aspersion

Au niveau de l'aspersion, l'efficacité du système est généralement déterminée à partir du coefficient d'uniformité de Christiansen, CU (Tiercelin et al., 2006) :

$$CU = 100 \left[1 - \frac{\sum (HE_i - HEM)}{n \cdot HEM} \right] \quad (\text{Éq. 26})$$

avec n , nombre de pluviomètres disposés selon une maille carrée ; HE_i , lame d'eau recueillie au niveau du pluviomètre I ; HEM , lame d'eau moyenne du réseau des n pluviomètres disposés selon une maille carrée.

Cette approche est relativement facile et permet d'apprécier l'uniformité de répartition de l'eau.

5. BESOINS EN EAU DES PLANTES, TENEUR EN EAU DU SOL ET MÉTHODES DE DÉTERMINATION

La détermination des besoins en eau des cultures passe par la connaissance de la quantité d'eau perdue par la

culture en condition réelle de production qu'on appelle l'évapotranspiration réelle (ETR) (Amigues et al., 2006). Elle varie selon les conditions physiologiques et d'approvisionnement en eau de la plante. Elle peut être inférieure ou égale à l'évapotranspiration maximum (ETM = Quantité d'eau perdue par une végétation jouissant d'une alimentation hydrique optimale) de la plante selon la disponibilité de l'eau dans le sol. La disponibilité de l'eau dans le sol s'exprime par la réserve utile :

$$(RU) : RU = (H_{cc} - H_{pfp}) \times D_a \times z \quad (\text{Éq. 27})$$

avec RU, Réserve utile en mm ; H_{cc} , humidité pondérale en % à la capacité au champ ; H_{pfp} , Humidité pondérale en % au point de flétrissement permanent ; D_a , Densité apparente du sol en $g \cdot cm^{-3}$; z , Profondeur d'enracinement en dm. La RU dépend des types de sols et seulement une fraction de cette réserve appelée réserve facilement utilisable (RFU) sera mobilisable sans effort par la plante. Elle est parfois estimée à la moitié de RU (Rieul et al., 2003). Lorsque l'offre en eau du sol correspond à la RFU, $ETR = ETM$; par contre, lorsqu'elle est inférieure à RFU, la plante ferme ses stomates et $ETR < ETM$.

Pour déterminer ETR, la notion d'évapotranspiration de référence (ET_{Ref} ou E_{To} ou E_{TP}) a été introduite et représente la quantité d'eau perdue par une végétation de référence en phase active de croissance recouvrant totalement un sol assurant une alimentation hydrique optimale (ray-grass) (Allen et al., 1998 ; Rieul et al., 2003 ; Amigues et al., 2006)

La détermination de l'ET_{Ref} se fait à l'aide de formules prenant en compte les données climatiques (formule de TURC, formule de BLANEY-CRIDDLE et l'équation FAO-Penman-Monteith), par des mesures sur bacs évaporométriques ou par des mesures lysimétriques de référence. La formule FAO-Penman Monteith est aujourd'hui la plus utilisée pour prévoir les besoins en eau des cultures et s'exprime par :

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (\text{Éq. 28})$$

avec E_{To}, Évapotranspiration de référence en mm par jour ; R_n , Rayonnement net à la surface de la culture en $MJ \cdot m^{-2} \cdot j^{-1}$; G , densité de flux de chaleur dans le sol, en $MJ \cdot m^{-2} \cdot j^{-1}$; T , température quotidienne moyenne de l'air à 2 m de hauteur en °C ; γ , constante psychométrique en $kPa \cdot ^\circ C^{-1}$; u_2 , vitesse du vent à 2 m de hauteur ; e_s , pression de vapeur saturante en kPa ; e_a , pression de vapeur réelle en kPa ; $e_s - e_a$, déficit de

pression de vapeur saturante en kPa ; Δ , pente de la courbe de pression de vapeur saturante à température T en $kPa \cdot ^\circ C^{-1}$.

L'évapotranspiration réelle est ensuite calculée en mettant à contribution les coefficients culturaux des cultures (K_c) (Doorenbos et al., 1977) à partir de l'expression :

$$ETR = K_c \times ET_{Ref} \quad (\text{Éq. 29})$$

6. QUELQUES APPROCHES D'ESTIMATION DE L'ÉVAPOTRANSPIRATION ET DE CALCULS DE L'EFFICIENCE ET DE LA PRODUCTIVITÉ DE L'EAU À L'AIDE DE PROGRAMMES INFORMATIQUES

La FAO, soucieuse d'améliorer l'efficacité et la productivité de l'eau, a développé à travers sa « Division Eau et Sol », des programmes informatiques permettant d'orienter la prise de décision, dont CROPWAT 8.0 et AQUACROP 4.0.

CROPWAT 8.0 pour Windows permet l'évaluation des besoins en eau des cultures et des besoins d'irrigation. Le programme est basé sur l'utilisation de trois types de données, les données du sol, du climat et des cultures et permet l'élaboration de programmes d'irrigation sous différentes conditions de gestion, ainsi que le calcul des calendriers d'irrigation avec la possibilité de faire varier les systèmes de culture. Le principe de fonctionnement et les procédures de calcul utilisées dans CROPWAT 8.0 sont fondamentalement basés sur deux publications de la FAO : FAO n°56 (Allen et al., 1998) et FAO n°33 (Doorenbos et al., 1979). Ce programme informatique offre la possibilité d'utiliser des données journalières, décennales ou mensuelles, contrairement à la plupart des logiciels d'approche similaire, qui eux demandent absolument des données journalières.

Quant à AQUACROP 4.0, c'est surtout un modèle de la productivité de l'eau des cultures, qui simule spécifiquement la réponse du rendement à l'eau des cultures herbacées. AQUACROP 4.0 requiert pratiquement les mêmes données d'entrée que CROPWAT 8.0.

Ces dernières années, des techniques de bilan énergétique utilisant des données satellitaires ont été développées pour l'évaluation de l'évapotranspiration (Bastiaanssen et al., 2000 ; Allen et al., 2007 ; Ahmad et al., 2009). C'est le cas des programmes tels que SEBAL (Ahmad et al., 2009), DSSAT4.5 (Salazar et al., 2012), SAMIR (Simoneaux et al., 2009), Ador Simulation (Lecina et al., 2006a ; Lecina et al., 2006b) etc., qui permettent de déterminer l'évapotranspiration à partir de données satellitaires. La collecte des informations

de terrain, notamment l'approvisionnement en eau des périmètres, permet ensuite de calculer les indicateurs de productivité et d'efficience de l'eau. Chaque modèle a ses niveaux de précision dans la détermination de l'évapotranspiration, mais le mode de calcul des indicateurs d'efficience et de productivité de l'eau dépend des variables à considérer et non du programme informatique.

L'utilisation de ces modèles est relativement onéreuse compte tenu du coût d'acquisition élevé des images satellitaires et ne convient pas pour les études à l'échelle de la parcelle. Les modèles FAO paraissent plus séduisants pour travailler à l'échelle de la parcelle et sont appropriés aussi bien pour les vulgarisateurs, les chercheurs que pour les besoins de formation.

7. CONCLUSION

Les notions d'efficience et de productivité de l'eau sont diversement appréhendées dans la littérature, selon les sensibilités scientifiques. Cela témoigne d'une prise de conscience généralisée de la raréfaction des ressources en eau et de la nécessité de disposer d'indicateurs pour estimer à la fois les pertes engendrées au cours de son usage, mais aussi les gains de production engrangés par unité d'eau consommée, afin de prendre des mesures correctives appropriées pour plus d'économie d'eau.

Cependant, la diversité de perception de ces concepts entraîne naturellement des confusions, mais aussi des divergences de fond, liées à l'utilisation de variables différentes dans le calcul d'un même indicateur.

Cette synthèse bibliographique a permis de passer en revue et d'éclaircir davantage les concepts d'efficience et de productivité de l'eau selon les domaines d'application. Il apparaît aussi que les travaux sur l'évaluation de l'efficience et de la productivité se sont beaucoup intéressés à l'appréciation de la situation existante et aux prédictions globales de la demande en eau. Un accent devra être mis spécifiquement sur les facteurs techniques et organisationnels de gestion de l'irrigation, qui impactent sur l'efficience et la productivité de l'eau à l'échelle de la parcelle. Dans ce sens, il serait, par exemple, intéressant de modéliser l'efficience d'application de l'eau en fonction des doses et fréquences d'irrigation, et la productivité en fonction de la période de mise en place de la culture, afin de proposer des approches physiques de conduite de l'irrigation à la parcelle qui offrent les meilleures efficacités d'application et de productivité. Les outils d'aide à la décision de la FAO, notamment CROPWAT et AQUACROP, pourraient être utilisés à cet effet. Un tel travail pourrait être d'un intérêt pour les pays sahéliens qui fondent un espoir certain sur le développement de leur agriculture grâce à l'irrigation, mais qui restent confrontés à la raréfaction de la ressource en eau.

Bibliographie

- Ahmad M.D., Turrall H. & Nazeer A., 2009. Diagnosing irrigation performance and water productivity through satellite remote sensing and secondary data in a large irrigation system of Pakistan. *Agric. Water Manage.*, **96**, 551-564.
- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D. & Smith M., 1998. *Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Roma: FAO.
- Allen R.G. et al., 2007. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC)-applications. *J. Irrig. Drain. Eng.*, **133**(4), 395-406.
- Amigues J.-P. et al., eds., 2006. *Sécheresse et agriculture. Réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau. Expertise scientifique collective, synthèse du rapport, INRA (France)*, http://agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/secheresse_agriculture_synthese.pdf, (05/10/2012).
- Barbour M.M. et al., 2010. Variability in mesophyll conductance between barley genotypes, and effects on transpiration efficiency and carbon isotope discrimination. *Plant Cell Environ.*, **33**, 1176-1185.
- Bastiaanssen W.G.M., Molden J.D. & Makin I.W., 2000. Remote sensing for irrigated agriculture: examples from research and possible application. *Agric. Water Manage.*, **46**, 137-155.
- Bluemling B., Yang H. & Pahl-Wostl C., 2007. Making water productivity operational. A concept of agricultural water productivity exemplified at a wheat-maize cropping pattern in the North China plain. *Agric. Water Manage.*, **91**, 11-23.
- Bos M.G. & Nugteren J., 1990. *On irrigation efficiency*. 4th ed. Wageningen, The Netherlands: International Institute for Land Reclamation and Improvement/ LRI.
- Bouaziz A. & Belabbes K., 2002. Efficience productive de l'eau en irrigué au Maroc. *Revue H.T.E.*, **124**, 57-72.
- Brouwer C., Prins K. & Heibloem M., 1989. *Irrigation water management: irrigation scheduling*. Training manual No 4. Roma: FAO.
- Burt C.M. et al., 1997. Irrigation performance measures: efficiency and uniformity. *J. Irrig. Drain. Eng.*, **123**, 423-442.
- Chossat J.-C. et al., 1987. L'irrigation par drains enterrés : résultats d'expérimentation et perspectives. *Drainage*, **22**, 9-11.
- Chossat J.-C. & Favrot J.-C., 2006. L'irrigation souterraine par réseau de drainage ou subirrigation. In : Tiercelin J.-R. & Vidal A., eds. *Traité d'irrigation*. 2^e éd. Paris : Lavoisier, 618-633.
- Compaoré M.L., 2006. Panorama des techniques d'irrigation et éléments de choix. In : Tiercelin J.-R. & Vidal A., eds. *Traité d'irrigation*. 2^e éd. Paris : Lavoisier, 489-512.

- Dembélé Y., Ouattara S. & Kéïta A., 2001. Application des indicateurs « approvisionnement relatif en eau » et « productivité de l'eau » à l'analyse des performances des petits périmètres irrigués au Burkina Faso. *Irrig. Drain.*, **50**, 309-321.
- Doorenbos J. & Pruitt W., 1977. *Guidelines for predicting crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 24. Roma: FAO.
- Doorenbos J. & Kassam A.H., 1979. *Yield response to water*. FAO Irrigation and Drainage Paper 33. Roma: FAO.
- Elliot R. & Walker W., 1982. Field evaluation of furrow infiltration and advance functions. *Trans. ASABE*, **25**, 0396-0400.
- FAO, 2002. *Crops and drops: making the best use of water for agriculture*. Roma: FAO.
- FAO, 2011. *L'état des ressources en terres et en eau pour l'alimentation et l'agriculture dans le monde. Gérer les systèmes en danger. Rapport de synthèse*. Rome : FAO.
- Flexas J. et al., 2010. Improving water use efficiency in grapevines: potential physiological targets for biotechnological improvement. *Aust. J. Grape Wine Res.*, **16**, 106-121.
- Giordano M., Rijsberman F. & Maria Saleth R., eds, 2006. *More crop per drop: revisiting a research paradigm*. London: IWA Publishing House.
- Hlavak R., 1992. *Critères de choix des systèmes d'irrigation*. New Delhi : ICID.
- IWMI, 1997. Améliorer les performances des périmètres irrigués. In : *Actes du séminaire régional du Projet management de l'irrigation au Burkina Faso, 24-26 juillet 1996, IWMI, Ouagadougou, Burkina Faso*.
- Keller A.A. & Keller J., 1995. *Effective efficiency: a water use efficiency concept for allocating fresh water resources*. Discussion paper 22. Arlington, VA, USA: Center For Economic Policy Studies, Winrock International.
- Lage M., Bamouh A., Badawi T. & El Mourid M., 2004. Productivité de l'eau et efficience de son utilisation par le riz conduit sous différents régimes d'irrigation dans la région du Gharb au Maroc. In : *Actes du séminaire Modernisation de l'Agriculture Irriguée, 19-24 avril 2004, Rabat, Maroc*, 95-96.
- Lankford B., 2012. Fictions, fractions, factorials and fractures; on the farming of irrigation efficiency. *Agric. Water Manage.*, **108**, 27-38.
- Lecina S. & Playán E., 2006a. A model for the simulation of water flows in irrigation districts: I. Description. *J. Irrig. Drain. Eng.*, **132**(4), 310-321.
- Lecina S. & Playán E., 2006b. A model for the simulation of water flows in irrigation districts: II. Application. *J. Irrig. Drain. Eng.*, **132**(4), 322-331.
- Merriam J.L. & Keller J., 1978. *Farm irrigation system evaluation: a guide for management*. Logan, UT, USA: Department Agricultural and Irrigation Engineering, Utah State University.
- Molden D. & Gates T., 1990. Performance measures for evaluation of irrigation water delivery systems. *J. Irrig. Drain. Eng.*, **116**, 804-823.
- Molden D. et al., 2010. Improving agricultural water productivity: between optimism and caution. *Agric. Water Manage.*, **97**, 528-535.
- Pereira L.S., Allen R. & Perrier A., 2006. Méthode pratique du calcul des besoins en eau. In : Tiercelin J.-R. & Vidal A., eds. *Traité d'irrigation*. 2^e éd. Paris : Lavoisier, 227-268.
- Perry C.J., 2007. Efficient irrigation; inefficient communication; flawed recommendations. *Irrig. Drain.*, **56**(4), 367-378.
- Playán E. & Mateos L., 2006. Modernization and optimization of irrigation systems to increase water productivity. *Agric. Water Manage.*, **80**, 100-116.
- Pochet B., 2005. *Méthodologie documentaire. Rechercher, consulter, rédiger à l'heure d'Internet*. 2^e éd. Bruxelles : Éditions De Boeck Université.
- Rao P.S., 1993. *Review of selected literature on indicators of irrigation performance*. Colombo, Sri Lanka: International Irrigation Management Institute.
- Rieul L., 1997. Techniques d'irrigation de l'avenir et leur coût. In : Dupuy B., ed. *Aspects économiques de la gestion de l'eau dans le bassin méditerranéen*. Bari, Italie : CIHEAM, 233-251.
- Rieul L. & Ruelle P., 2003. *Guide Pratique. Irrigation*. 3^e éd. Paris : Cemagref.
- Rodriguez-Díaz J.A., Camacho-Poyato E., Lopez-Luque R. & Perez-Urrestarazu L., 2008. Benchmarking and multivariate data analysis techniques for improving the efficiency of irrigation districts: an application in Spain. *Agric. Syst.*, **96**, 250-259.
- Sadras V.O. & Angus J.F., 2006. Benchmarking water-use efficiency of rainfed wheat in dry environments. *Aust. J. Agric. Res.*, **57**, 847-856.
- Salazar M.R. et al., 2012. Estimating irrigation water use for maize in the Southeastern USA: a modeling approach. *Agric. Water Manage.*, **107**, 104-111.
- Simonneaux V. et al., 2009. Estimation spatialisée de l'évapotranspiration des cultures irriguées par télédétection : application à la gestion de l'irrigation dans la plaine du Haouz (Marrakech, Maroc). *Sécheresse*, **20**(1), 123-130.
- Tiercelin J.-R. & Granier J., 2006. L'irrigation par aspersion. In : Tiercelin J.-R. & Vidal A., eds. *Traité d'irrigation*. 2^e éd. Paris : Lavoisier, 549-583.
- van Halsema G.E., 2002. *Trial and retrial: the evolution of irrigation modernization in NWFP, Pakistan*. PhD thesis: Wageningen University (The Netherlands).
- van Halsema G.E. et al., 2011. Performance assessment of smallholder irrigation in the Central Rift Valley of Ethiopia. *Irrig. Drain.*, **60**, 622-634.
- van Halsema G.E. & Vincent L., 2012. Efficiency and productivity terms for water management: a matter of contextual relativism versus general absolutism. *Agric. Water Manage.*, **108**, 9-15.

- Viets F.G., 1962. Fertiliser and efficient use of water. *Adv. Agron.*, **14**, 223-264.
- Walker S.H., 1999. Causes of high water losses from irrigated rice fields: field measurements and results from analogue and digital models. *Agric. Water Manage.*, **40**, 123-127.
- Walker S.H. & Rushton K.R., 1986. Water losses through the bunds of irrigated rice fields interpreted through an analogue model. *Agric. Water Manage.*, **11**, 59-73.
- Walker W., 1989. *Guidelines for designing and evaluating surface irrigation systems*. FAO Irrigation and Drainage Paper 45. Roma: FAO.
- Wellens J. & Nitcheu M., 2009. *Le périmètre irrigué de la Vallée du Kou : diagnostic des efficacités hydro-agricoles & élaboration des calendriers à l'aide de SIMIS (étude de cas)*, http://www.ge-eau.org/Documents/SIMIS_etude%20de%20cas.pdf (05/10/12).

(52 réf.)