



HISTOIRE DE LA GOUVERNANCE DE L'EAU (DEUXIEME PARTIE)

D. SMADHI¹, L. ZELLA²

¹ Institut National de Recherche Agronomique, Algérie,
E-mail : dalsmadhi@yahoo.fr

² Maître de Conférence, Université de Blida, Algérie,
E-mail : lakhdarz@yahoo.fr

INTRODUCTION

Les bases de la gouvernance de l'eau ont été initialement pratiquées, durant des milliers d'années, par les anciennes civilisations mésopotamienne, perse, égyptienne, chinoise et aztèque. Cette gouvernance s'est matérialisée par la réalisation d'ouvrages hydrauliques divers, comme les canaux, les barrages et les foggaras. Des machines tels le chadouf, la noria et le moulin à eau ont été inventées, permettant le relevage et la répartition des eaux fluviales aux surfaces irriguées, assurant la pérennité de la production céréalière. L'alimentation humaine a été ainsi assurée durant longtemps. Cependant, ces civilisations ont subi le sort de la disparition sans que l'on sache clairement les causes, d'autres les ont relayés bénéficiant de tout le capital expérimental et du savoir-faire acquis. C'est le cas de la civilisation gréco-romaine succédant à la civilisation égyptienne, mais jouissant d'une religion nouvelle, d'un espace géographique sous des conditions climatiques relativement clémentes et favorables à la culture pluviale. L'irrigation des terres n'est plus prioritaire, les souverains doivent répondre à de nouveaux besoins, ceux d'alimenter en eau une population croissante et qui s'urbanisent de plus en plus. L'hydraulique urbaine devient une priorité. C'est aussi le cas de la civilisation arabo-musulmane qui a émergé en plein désert arabe, sur les restes de la civilisation mésopotamienne. Dans cette analyse, on se propose de souligner les principaux progrès hydrauliques réalisés et appliqués à l'irrigation afin d'améliorer son efficacité. La progression continue de l'irrigation par les nouvelles civilisations. Sa synergie avec la sécurité alimentaire et son impact tant sur le plan socio-économique et écologique que sur les aspects quantitatifs et qualitatifs des ressources en eau sont à redéfinir.

L'HYDRAULIQUE DANS LA CIVILISATION GRECO-ROMAINE

L'apport philosophique

Ces deux grandes civilisations se sont presque superposées dans le temps et dans l'espace. Elles sont surtout glorifiées, l'une par ses richesses philosophiques et organiques et l'autre par son génie universel en hydraulique et ses exploits militaires. Parmi les philosophes de cette époque, Thalès de Milet (640-546 av. J-C) ainsi que Pythagore de Samos, Démocrite, Platon et Aristote. Le potentiel du savoir-faire hydraulique, hérité des civilisations antérieures, a été approfondi et élargi à la qualité des eaux, à la maîtrise des eaux souterraines ainsi qu'à d'autres aspects hydrauliques. Cet intérêt a été initialement focalisé par l'ouvrage d'Hippocrate (460-337 av. J-C) intitulé "les climats, les eaux et les contrées", dans lequel l'accent a été mis sur l'intérêt médicinal de l'eau, suivi par les hypothèses de la formation des eaux souterraines, abordées par les théories de Sénèque et d'Aristote (384-322 av. J-C). Cette théorie suppose que c'est l'humidité de l'air qui donne naissance aux eaux souterraines dans les cavernes terrestres, émergeant ailleurs sous formes de sources (Nordon, 1992). La canalisation de l'eau pour les usages de la vie quotidienne, déjà maîtrisée en Mésopotamie et en Egypte, apparaît en Grèce dès le VI^e siècle av. J-C avec le tunnel considéré, par Hérodote comme l'ouvrage, le plus grand de son temps (Bernadis, 1990). Inspiré par les anciennes découvertes, Ctésibios invente, vers le III^e siècle av. J-C, une roue hydraulique qui aboutit plus tard à la pompe aspirante-foulante (Carlier, 1980; Nordon, 1992). Ce savant grec a aussi mis au point l'hydraule, à l'origine du mot hydraulique, une espèce d'orgue produisant la musique par la résonance de l'écoulement. Au troisième siècle avant notre ère, Archimède, connu par sa célèbre loi sur la poussée hydrostatique et la flottabilité, met en service la vis qui porte son nom, constituée d'une hélice tournant dans un cylindre creux et permettant de remonter l'eau sur de faibles pentes (Carlier, 1980). Ces inventions ont contribué largement à améliorer l'exhaure de l'eau profonde et l'acheminement de l'eau en altitude. Actionné à bras d'homme, l'appareil d'Archimède a une longueur de 2,4 m et un diamètre de 0,3 m pouvant débiter 160 à 235 l/min. Cette vis sans fin (figure 1) a été utilisée couramment pour irriguer des terrains en léger surplomb par rapport à une source d'eau.

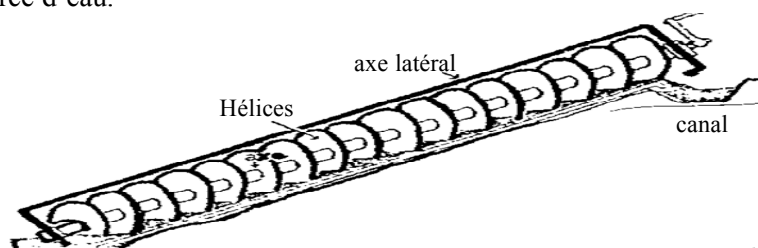


Figure 1 : Schéma de la vis d'Archimède

L'ère des aqueducs et du siphon

Avant d'atteindre le sommet de leur puissance, en 312 av. J-C, les romains se sont contentés d'exploiter l'eau du fleuve (le Tibre), en utilisant l'écoulement gravitaire (Bernadis, 1990), l'eau des puits n'a été que tardivement sollicitée. Des ouvrages d'adduction d'eau aux villes romaines font leur apparition et la distribution de l'eau été conduite aux zones éloignées de la source via les aqueducs. Le premier aqueduc souterrain d'Appia, réalisé par Appius Claudius, été destiné à combler les besoins en eau d'une population de plus en plus croissante. Cet ouvrage de 16 km de longueur, sur une dénivelée de 10 m, véhicule un débit de 1 500 m³/h et quarante ans plus tard, deux autres aqueducs ont été réalisés à savoir, l'aqueduc d'Anio d'une longueur de 63 km et d'un débit de 7 000 m³/h et l'aqueduc de Marcia de 91 km dont une grande partie est souterraine (Bernadis, 1990). A l'époque impériale, Rome est alimentée par neuf aqueducs, à partir des sources et des rivières dont le plan d'eau est surélevé au moyen d'une digue ou de la vis d'Archimède.

Les techniques hydrauliques sont en évolution et le siphon renversé, une invention attribuée à Filon de Byzance (Nordon, 1992), est utilisé pour la première fois dans l'alimentation des fontaines publiques et des thermes. Il contribue à irriguer les jardins du domaine impérial, le long des aqueducs.

Mesure de débit

Les débits dont l'unité de mesure est la *quinaria*, sont estimés à l'aide d'un tuyau de 2,3125 cm de diamètre, raccordé à un bassin. La charge d'eau de ce dernier est totalement ignorée (Bernadis, 1990). Cette unité de mesure est similaire au *pouce fontainier*, utilisé en France défini par le débit donné par un orifice de un pouce (0,027 m) de diamètre et une charge d'eau constante de 0,225 cm, soit un flux de 0,22 l/s. Le *meulant d'eau*, été aussi en usage comme unité de débit, correspondant à 200 l/s, c'est le flux d'eau susceptible de faire tourner une roue de moulin. Ce progrès de la mesure standardisée favorise la réglementation de la distribution qui se fait désormais d'une manière très précise, vers l'an 11 av. J-C (Bernadis, 1990).

Hydraulique romaine en Afrique du nord

Le savoir hydraulique romain est propagé dans les nouvelles colonies de l'Afrique du Nord (ex Numidie) en l'an 105, notamment en Tunisie et en Algérie comme en témoignent les vestiges historiques (Alba, 1957). Quelques cas méritent d'être cités, comme les *castellum* ou réservoirs de la Malga à Carthage, d'une capacité de 44000 m³ et l'aqueduc de Zaghouan d'une longueur de 132km véhiculant un débit de 25.000 m³/jour (Bakhlouti, 2003). En Algérie, les empreintes hydrauliques concernent surtout les aqueducs entre Toudja et Bejaia d'une longueur de 21km, celui de Constantine de 35 km ou celui reliant

Badias sur l'Oued El Arab de 90km. Dans les anciennes villes romaines telles Cherchell, Tipaza, Timgad ou Djemila, les aménagements hydrauliques urbains sont encore visibles, les thermes de Khenchella, encore en usage, confirment l'intérêt des romains à l'hydraulique urbaine (Arrus, 1985). La civilisation greco-romaine s'est propagée à l'est comme au sud de la méditerranée sur les terroirs des anciennes civilisations, une région qui va constituer le berceau de la civilisation arabo-musulmane.

L'HYDRAULIQUE DANS LA CIVILISATION MUSULMANE

Les arabo-musulmans sont à leur tour légataires du centre de développement après la ruine des empires sassanide, romain et byzantin vers la fin du VI^e siècle. L'Islam est la nouvelle religion conduite par son prophète Mahomet, en un siècle, entre l'an 632 et 732, les arabo-musulmans ont conquis un immense territoire, allant du Turkestan chinois à l'est aux Pyrénées occidentales (Alba, 1957). Damas, Bagdad, le Caire et Cordoue sont devenues les capitales mondiales d'où rayonnent la science et le progrès. Plusieurs savants se sont distingués de l'an 860 à 1200, il s'agit de Abu Masar, Banu Musa, Khawarizmi, Qusta Ben Luqu, Ibn El Haythan, Ibn Sina, Averroes et Al Jazari qui, selon Mamou (1988), ont laissé des traces indélébiles d'ingéniosités hydrauliques. Une bonne partie des théories hydrologiques et hydrogéologiques modernes, trouvent leur origine dans les conceptions naturalistes des savants arabo-musulmans du Moyen-Age (Mamou, 1988 ; Nordon, 1992). Ces derniers ont hérité et exploité les connaissances mésopotamiennes, pharaoniques, grecques et romaines. La classification des eaux en se référant à leur potabilité a été développée par Ibn Sina (980-1037), expliquant le rôle purificateur de l'argile (Nordon, 1992). L'apogée de leur savoir est marqué par le développement des horloges à eau, nécessaires à la maîtrise du temps. Il est rapporté par Nordon (1992) que, Al Biruni ayant vécu entre l'an 973 et 1080, a explicité les premières notions du cycle de l'eau, mettant en évidence le devenir des précipitations pluviales, en ruissellement, en évaporation et en infiltration. L'agriculture a été savamment maîtrisée et l'irrigation musulmane a connu son apogée au cours XI^e et XII^e siècle, matérialisée dans les régions de Valence, de Grenade et d'Andalousie (Bolens, 1972).

Après la décadence de l'Empire arabo-musulman, l'Europe relance aussitôt son développement en prélude à la révolution industrielle, l'hydraulique va connaître un nouveau souffle particulièrement provoqué par les romains.

L'ERE DE L'HYDRAULIQUE URBAINE

L'hydraulique empirique

L'eau a constitué de tout temps, un enjeu capital pour asseoir le pouvoir et garantir le développement socio-économique, elle est devenue le nerf de

L'urbanisation préindustrielle, entamée au XI^e siècle en Europe. L'urbanisation est en pleine expansion et des industries de meunerie, de tissage et de tannerie se multiplient parallèlement. Les besoins alimentaires sont de plus en plus croissants et la mouture des céréales exige de nombreux moulins à eau. Ces derniers exploitent l'énergie potentielle fournie par les chutes d'eau, nécessaires au fonctionnement des roues des moulins, valorisée en énergie cinétique. Ainsi le moulin à axe vertical et à roue horizontale, actionné par l'énergie hydraulique est la première machine automatique conçue par l'homme à cette époque (Nordon, 1992). Elle est inspirée du moulin horizontal, inventé déjà au Moyen Orient. Ces nouvelles machines ont nécessité des débits de 10 à 12l/s et une hauteur de chute de 6 à 12m, générant une puissance de 4 à 6 cheval-vapeur (Bernadis, 1990).

L'eau est devenue un élément fondamental de l'aristocratie, elle est au service de l'hygiène, de l'esthétique et de l'agrément. Le réseau hydraulique de surface est enterré, les eaux usées sont évacuées hors des villes via les rivières et les fosses septiques sont progressivement abandonnées. L'utilisation de la vapeur d'eau très sollicitée par les industries du XIV-XVI^e siècle favorise l'invention de la machine à vapeur qui va accélérer le développement. Dans les années 1500, les observations de l'illustre et controversé Léonard de Vinci et les tâtonnements de Bernard Passily ont donné l'esquisse de la science d'hydraulique (Nordon, 1992). Cette époque est aussi marquée par le célèbre Galilée (1564-1642) avec sa contribution sur la chute des corps, ainsi que son élève Evangelista Torricelli (1608-1647) ayant émis des hypothèses à propos du calcul de la vitesse à travers l'orifice et la détermination de la pression atmosphérique.

L'école italienne a pris un essor brillant aux XVI et XVII^e siècle, se permettant le luxe d'établir des relations entre les rivières, les sources, les eaux souterraines qui s'alimentent des précipitations mais les bilans et les estimations restent encore trop approximatives (Bernadis, 1990).

Les français ont aussi pris part au développement de l'hydraulique grâce aux travaux de Edmée Mariotte (1620-1684) et son principal ouvrage '*Traité du mouvement de eaux et des autres corps fluides*'. Un contemporain de Mariotte, l'anglais Robert Hooke (1635-1703), célèbre par sa loi sur l'élasticité a contribué à la mise au point des anémomètres et des moulinets ou du mathématicien Hollandais Simon Stevin (1548-1620) qui s'est distingué par son intérêt à l'hydrostatique et aux forces de pression sur les parois.

La généalogie des infrastructures hydrauliques montre que la civilisation greco-romaine a focalisé ses efforts dans le domaine de l'hydraulique urbaine, en perspective d'une utilisation industrielle de l'eau. Ces avancées ont eu un impact direct sur l'irrigation et ont permis à faire émerger les assises d'une science : l'hydraulique générale.

L'HYDRAULIQUE: UNE SCIENCE

L'hydraulique est née dans le terreau de l'empirisme des canaux d'irrigation mésopotamiens, des aqueducs romains et des idées philosophiques grecques, évoluant d'une pensée métaphysique à une science physique. L'empirisme laisse peu à peu la place à la rationalité des théories générales, élaborées grâce au développement des mathématiques. Cette transition s'est appuyée sur les travaux des philosophes René Descartes (1598-1650) et Blaise Pascal. Le cycle de l'eau dans la nature focalise les intérêts et les idées émises contribuent à son exploration et sa maîtrise. L'imitation de la nature inspire les inventions anthropiques et le puits incarne la source, le canal copie la rivière et le barrage reconstitue le lac naturel.

Depuis que l'hydraulique a bénéficié des progrès des mathématiques et de la mécanique, en plein essor, des théories plus élaborées, relatives à la dynamique des liquides, se sont développées, tel le concept de *vis viva* ou quantité de mouvement décrit par Leibniz et Euler au XVII^e siècle, (Carlier, 1980). L'hydraulique est désormais une science à part.

Cette liste est trop exhaustive et ne peut rendre compte des nombreuses découvertes en hydraulique du XIX^e et XX^e siècle. Cependant, la plupart des découvertes vont s'avérer fondamentalement utiles au développement de l'hydraulique appliquée à l'irrigation. C'est le cas du célèbre théorème de Daniel Bernoulli, inspiré des réflexions de Galilée et de Huygens, dont il est fait usage quasi constamment en hydrodynamique. Aussi l'écoulement par les déversoirs modélisé par Bazin (1829-1917), ou les lois sur la viscosité des liquides et le régime de l'écoulement, respectivement étudiées par George Gabriel Stokes (1819-1903) et l'Anglais Osborne Reynolds (1842-1912), ont trouvé de nombreuses applications en irrigation, (Carlier, 1980). Joseph Louis Lagrange qui développe les résultats d'Euler ou Pierre Simon Laplace ont donné une impulsion à théorisation de l'hydraulique.

La transformation de l'énergie potentielle hydraulique en énergie cinétique par les moulins a donné naissance au XIX^e siècle, à l'invention de la turbine produisant l'électricité. Cette invention de Fourneyron, en 1836, a donné la turbine développant une puissance de 50 cheval-vapeur, elle est devenue l'ancêtre des turbines Pelton et Francis (Bernadis, 1990), célèbres de nos jours. Cette découverte a permis de produire plus de 25% de l'électricité du monde et sans laquelle une centrale nucléaire ne peut fonctionner. Depuis, l'électricité a révolutionné l'ensemble des secteurs de l'activité humaine et de l'hydraulique.

Quelques années plus tard, l'hydrologie quantitative a émergé grâce aux équations du mouvement de l'eau dans le sous sol et dans les canaux, élaborées par Darcy et Dupuit (1856) cité par Carlier (1980), ces théories vont être largement exploitées pour le développement de l'irrigation-drainage. Ainsi, aux méthodes par tâtonnement empiriques de jadis, succède à partir des années 1930, un effort de rationalisation. Il permet à l'hydraulique de bénéficier des avancées théoriques des autres disciplines, et sa spécialisation au fil du temps et

de l'eau. C'est l'avènement de la mécanique des fluides. L'irrigation, donnant naissance à l'hydraulique, s'est consacrée à évaluer et à apporter l'eau aux cultures. Elle est devenue une science utilisant les théories de l'hydraulique générale mais aussi les connaissances de la physiologie végétale, de la climatologie, de l'agronomie et bien d'autres.

LES PROGRES DE L'IRRIGATION

Objectifs de l'irrigation

L'irrigation est pratiquée depuis l'antiquité pour stimuler voire doper la production agricole notamment dans les zones arides et semi-arides. Elle a, dans ce sens une valeur inestimable, puisqu'elle crée la vie et la richesse. L'irrigation permet la culture des terres incultes, que l'extrême sécheresse a voué à la stérilité. De nos jours, l'accroissement des besoins alimentaires renforce le recours à l'irrigation, reconnue comme un facteur avéré d'intensification de la production agricole, de plus en plus nécessaire, y compris dans les pays humides. En suivant ce long itinéraire, on se rend compte, qu'elle est passée de l'art à la technique et qu'elle s'impose comme un garant de la sécurité alimentaire et de la valeur ajoutée. C'est pourquoi, les frais d'installation et d'équipement d'une part (amendement du sol, appareils...) et les frais d'exploitation d'autres parts (énergie, main-d'œuvre...) doivent intervenir pour une large mesure dans le choix de la technique d'irrigation.

Techniques d'irrigation

Cette exigence de l'optimisation, à la recherche de l'efficacité maximale, a favorisé l'amélioration des techniques d'irrigation, en passant de l'irrigation de surface; une technique ayant prévalu depuis l'époque préhistorique, à l'aspersion et enfin à la technique de micro-irrigation. L'irrigation s'appuie sur deux secteurs techniques; l'un lui fournit ses moyens de réalisation relevant du génie civil (barrage, canaux ...) et du génie industriel (conduites, pompes, vannes...) et l'autre vise à l'amélioration de la production agricole dépendant essentiellement de l'agronomie. Les techniques d'irrigation sont restées immuables jusqu'au début du XX^e siècle. La technique d'irrigation de surface qui, grâce à sa simplicité, perdure depuis la naissance de l'irrigation et domine actuellement l'espace irrigué du monde. Basée sur l'écoulement de l'eau par gravité, elle a évolué selon trois variantes : le ruissellement, la submersion ou l'infiltration, variantes qui nécessitent beaucoup d'eau et malgré l'apport technologique d'une gamme de matériel (siphon, vannes, canaux), elles provoquent d'énormes pertes d'eau et des conséquences néfastes pour l'environnement.

Depuis l'étude du complexe eau- sol- plante-atmosphère, qui a apporté davantage de précision dans l'estimation des besoins en eau des cultures,

apparaît dans les années 1950, l'irrigation par aspersion. Celle ci utilise le transport et la distribution de l'eau sous pression dans des tuyaux, en alliage d'aluminium munis d'asperseurs, sa généralisation a permis l'extension de l'irrigation à de nouvelles surfaces, jusque là inaccessibles à l'irrigation par gravité. Elle améliore l'efficacité de l'irrigation de 50% à 80%, mais elle s'avère encombrante et onéreuse par son équipement et sa consommation d'énergie. Dans les années 1960, le développement du plastique, plus maniable et moins cher, contribue à l'apparition d'une nouvelle technique d'irrigation, la micro-irrigation qui améliore fortement le rendement hydraulique et l'efficacité de l'irrigation à plus de 95%. Sa particularité d'apporter l'eau individuellement à chaque plant, lui offre l'avantage de maximiser la production agricole pour chaque mètre cube investi. Elle est très recommandée pour les pays arides et semi arides.

Pilotage de l'irrigation

Les méthodes les plus utilisées encore actuellement pour contrôler l'irrigation se fondent soit sur l'élaboration d'un bilan énergétique, soit sur l'estimation du bilan hydrique. Elles représentent cependant des limites. Les premières ne prennent pas en compte les propriétés du sol gouvernant les conditions de transfert de l'eau vers les racines. Les secondes nécessitent de définir au préalable, des valeurs seuils du potentiel hydrique du sol, qui ne peuvent représenter toute l'hétérogénéité du sol. Cependant à cause de leur simplicité et bien qu'approximatives, les anciennes méthodes sont restées dominantes sur le terrain. En effet, elles ne prennent en considération la plante, qu'à travers une mesure globale de sa consommation en eau et de valeurs seuils statiques qui sont opposées à la dynamique du continuum eau-sol-plante-atmosphère.

Aussi, les techniques de pilotage de l'irrigation, visent sur la base des connaissances les plus récentes acquises notamment en physiologie végétale, (INRA France) à améliorer l'efficacité de l'irrigation en adoptant l'eau utilisée par celle ci aux besoins en eau des espèces cultivées. Ces nouvelles stratégies, gagnant plus de précision se proposent d'apporter le potentiel productif, quantitatif et qualitatif, à son maximum en évitant tout apport d'eau et d'éléments chimiques inutiles voire nuisibles.

Irrigation de précision

L'évolution des nouvelles techniques de pilotage, étudiées à l'Institut National de la Recherche Agronomique de France, permet d'intégrer les variations de l'état hydrique de la plante par des mesures en continu, utilisant divers indicateurs. On peut citer, les mesures par micrométrie des variations de l'état hydrique des plantes, à l'aide de capteur évaluant les contractions du diamètre, de la tige ou du fruit. Le traitement informatique de ces données permet de

déterminer à quel moment l'eau doit être apportée avant que la plante subisse le stress, pouvant affecter sa production de biomasse.

Un autre indicateur physiologique, lié à l'écoulement de l'eau dans les vaisseaux de la plante est élaboré pour évaluer le potentiel hydrique des tissus végétaux. En absence d'eau, des poches d'air s'introduisent dans les vaisseaux de sève, provoquant le phénomène de cavitation, bien connu en hydraulique des conduites. La rupture de la tension de la sève produit des ultrasons audibles et mesurables par microphone. L'apport d'eau à ce moment est nécessaire.

Les mesures du flux de sève peuvent être effectuées dans les organes ligneux des arbres par voie thermique, grâce à un capteur constitué de deux sondes et renfermant chacune un thermocouple enfoncé dans le bois. L'absence de flux de sève provoque un écart de température maximal entre les deux sondes.

La température foliaire est aussi un autre indicateur intéressant. Quand l'eau s'évapore par les stomates de la feuille, celle-ci se refroidit, alors que lors d'un manque d'eau, les stomates se ferment, la transpiration diminue et la température de la feuille augmente. Ce changement de température, associé à une variation de l'émission de rayons infrarouges, mesurable à l'aide d'un radio-thermomètre portable est corrélé aux besoins d'eau.

Ces techniques, basées sur les indicateurs biologiques sont associées au progrès technologique dans le domaine de l'imagerie satellitaire, et de la météorologie, on pourrait espérer dans l'avenir l'irrigation de précision avec une efficacité maximale. L'intégration de toute la base de données, permet à l'ingénieur d'organiser un plan de travail rigoureux et précis. Le dosage judicieusement calculé, au bon endroit des apports d'eau et d'intrants font l'objet d'un programme prédéfini. Ce produit final peut contribuer à une meilleure gestion des ressources en eau, en sol et en énergie mais aussi une utilisation rationnelle des outils de travail, dans le respect de l'environnement.

SITUATION DANS LE MONDE : DESESPOIR ET ESPOIR

Nécessité de l'irrigation

Depuis son apparition au néolithique, l'utilisation de l'irrigation n'a pas cessé de se répandre dans le monde, parallèlement à la croissance de la population. Elle couvre aujourd'hui une superficie de l'ordre de 250 millions d'hectares, fournissant près de 40% de la production alimentaire mondiale (FAO, 2002). Considérant l'étroite association de l'irrigation à la sécurité alimentaire, il est estimé (FAO, 2002) que 80% des besoins alimentaires des 8 milliards de personnes attendues en 2025, seront couverts par l'agriculture irriguée. De la même source, on apprend que près de 800 millions de personnes dans le monde, vivant particulièrement dans les régions arides et semi arides, souffrent de la faim. Afin d'enrayer cette situation, les surfaces irriguées doivent accroître de 34% mais avec une augmentation des quantités d'eau de seulement 14%, pour ne pas aggraver la situation de pénurie d'eau. A cet égard, il faut signaler que

70% des prélèvements mondiaux d'eau douce sont destinées à l'irrigation (FAO, 2002), dont seule la moitié est effectivement consommée par l'évapotranspiration des cultures, l'efficacité est très faible. Pour illustrer la consommation d'eau par les cultures, deux exemples peuvent être cités : une tonne de céréales récoltée exige 1000 à 3000m³ d'eau et un kilogramme de riz consomme 1 à 3 tonnes d'eau.

Les pays qui souffrent de l'insuffisance alimentaire sont des pays dont l'irrigation est très déficiente causant d'énormes pertes d'eau. Leurs ressources en eau sont très limitées et leur population est croissante. La solution pour les pays non riches est inévitablement la maîtrise de l'irrigation et la gouvernance de toute la ressource en eau. Une analyse réalisée par des experts de la FAO (2002), portant sur 93 pays en développement, montre qu'en portant l'efficacité de l'irrigation à 42%, les superficies irriguées actuellement peuvent augmenter de un tiers.

En général, la production alimentaire globale a crû plus vite que la population humaine. Cependant, il y a de fortes disparités entre les continents. Par exemple en Afrique, la production des céréales ne peut suivre l'augmentation de la population, ce qui indique une certaine intensification de l'agriculture. En revanche, la limite d'exploitation des terres disponibles a été atteinte dans certains pays en Asie (Bazzaz, 1997). L'exploitation intensive de l'eau pour l'irrigation fragilise la disponibilité en eau, une vingtaine de pays sont dans une situation critique où plus de 40% de leurs ressources renouvelables en eau sont utilisées en irrigation (FAO, 2002) et une quarantaine de pays connaissent déjà le stress, sachant que la situation du stress hydrique d'un pays est atteinte, quand les prélèvements en eau dépassent 20%.

Cependant la raréfaction des ressources en eau, la concurrence des autres usagers de l'eau ainsi que les interrogations sur la durabilité des aménagements hydrauliques contraignent à un effort de recherche important pour réaliser des économies d'eau, accroître l'efficacité de son utilisation et mieux maîtriser les impacts environnementaux de l'agriculture irriguée. Le coût élevé des projets d'irrigation freine les investissements notamment dans les régions touchées par la sécheresse. Depuis le milieu des années 1980, plusieurs gouvernements dans le monde ont introduit une nouvelle forme de gouvernance de l'irrigation en transférant la gestion des périmètres irrigués des organismes publics aux organisations d'exploitants non gouvernementales (Vermillion et Sagardoy, 2001). Cette forme de gestion est destinée à réduire les coûts de l'irrigation en augmentant sa rentabilité. Cependant le non-développement de l'irrigation est aussi imposé par les subventions des denrées alimentaires, produites en trop par les pays industrialisés, mettant en péril l'existence même de la paysannerie locale (Bär, 2003).

De l'histoire de l'irrigation, un fait se dégage : l'irrigation bien menée apporte la prospérité et la richesse. Cependant, les causes des insuccès sont nombreuses et résultent essentiellement de l'importance exagérée des dépenses de premier établissement, des études trop superficielles, de la méconnaissance des principes

de l'irrigation et de l'emploi irrationnel de l'eau. Bien que les irrigations aient pour objet d'assurer la récolte en dépit des conditions météorologiques, elles n'en conservent pas moins, un caractère spéculatif. De nombreuses entreprises de cette nature sont allées à la ruine pour des causes multiples. Les charges par hectare irrigué sont excessives alors que la norme n'admet pas qu'on dépasse 5 à 10% du produit brut à l'hectare. Les conditions socio-économiques dans la région irriguée, ne sont pas favorables au développement de l'irrigation, soit à cause du manque de main d'œuvre ou de capitaux, soit du manque des deux et soit du manque de technicité des agriculteurs. Les extrêmes climatiques qui limitent la production agricole peuvent annuler les bienfaits de l'irrigation.

Les insuccès de l'irrigation

L'insuccès de l'irrigation peut être illustré par ces célèbres exemples :

- i.* La salinisation des terres est un phénomène souvent provoqué par la sur-irrigation, le cas le plus significatif étant celui de la vallée mésopotamienne où des milliers d'hectares ont été rendus stériles, ce cas est cité dans la première partie de cette étude.
- ii.* L'abus de l'irrigation abouti au phénomène d'assèchement des nappes d'eau de surface ou souterraines et des cours d'eau. Les prélèvements d'eau à partir du Syr-Darya pour les besoins de l'irrigation intensive, des superficies de coton au Kazakhstan ont diminuer le débit entrant à la mer d'Aral, provoquant une baisse de 16 m du niveau de la mer, entre 1962 et 1994. Son volume a diminué de trois quarts provoquant la disparition de plusieurs espèces de poissons et l'annulation de 60.000 emplois (FAO, 2002). Les barrages ont aussi asséché plusieurs cours d'eau comme le Huang He et le Colorado et plusieurs nappes d'eau souterraines. La baisse annuelle des nappes des pays ayant un déficit hydrique, s'élève selon la FAO (2002) à 160 km³, ce qui correspond à un équivalent en céréales de 180 millions de tonnes. Les phénomènes de subsidences ou affaissement des terrains sont consécutifs aux prélèvements massifs d'eau souterraine particulièrement importants dans certaines régions en Californie.
La facture annuelle des importations alimentaires de l'Algérie, pour combler le déficit de l'irrigation, s'élève à quelques trois milliards de dollars US. A titre d'illustration, cette somme représente le coût global des dégâts enregistrés par le séisme de Boumerdès en 2003. Autant dire que chaque année, l'Algérie se paye un séisme de cette intensité causé par l'insuffisance des pluies et par l'inefficacité de la gouvernance de l'eau.
- iii.* L'engorgement en eau des sols est aussi provoqué par une sur-irrigation. Un méga projet, de 22 milliards de DA, est destiné à apporter une solution au problème de la remontée de la nappe dans la région d'El-Oued (Algérie). Une région démunie d'émissaire naturel d'évacuation, elle constitue le réceptacle des eaux d'irrigation et de quelques 50.000 fosses septiques. La nappe

surélevée est une conséquence visible de l'insuccès de la gestion de l'eau, durant des dizaines d'années, dans cette région, ayant provoqué l'asphyxie de 1,5 millions de palmiers dattiers et la perte de milliers d'emplois. Sur le plan qualitatif, le milieu naturel est totalement pollué par les rejets domestiques et agricoles, et l'insalubrité a accéléré les risques endémiques.

iv. La construction des barrages modifie l'équilibre hydraulique naturel par la saturation et l'épuisement des nappes respectivement à l'amont puis à l'aval. Le barrage d'Assouan sur le Nil, est une assurance avérée pour sa capacité stockée d'eau allant à 185km³. Il assure l'irrigation des milliers d'hectares et la production de suffisamment d'électricité pour le pays, mais au même moment, il a dérégulé tout l'équilibre naturel et l'apport d'alluvions sur le delta et tout le long du fleuve est stoppé par la digue. La nappe saline s'infiltré dans le continent et la richesse biologique marine à l'embouchure s'appauvrit, en revanche la pollution s'accroît par l'utilisation des engrais chimiques.

Les eaux du Nil traversent dix pays et environ 160 millions de personnes vivent sur son bassin. Dans le monde le nombre de barrages réservoirs s'élève à 35.000 totalisant une capacité d'eau de 8000km³ de quoi perturber l'équilibre local allant jusqu'à l'inversion du régime climatique saisonnier. Ces exemples illustrent les insuccès de l'irrigation, qui se découvre comme une arme à double tranchant. Elle assure la sécurité alimentaire mais les pays dont l'économie repose sur l'irrigation doivent maîtriser cette technique afin d'éviter les conséquences néfastes.

CONCLUSION

Face à l'ambivalence de l'eau, l'attitude de l'humanité a procédé de deux actions antagonistes. D'une part, la soumission par impuissance aux conditions hydrauliques existantes. D'autres parts, les modifications apportées au milieu naturel de plus en plus domestiqué et anthropisé à outrance. Dans les deux cas, les conséquences socio-économique et écologique se sont avérées négatives. Trop souvent ces stratégies de gouvernance de l'eau ont été élaborées en négligeant leurs impacts hydrauliques, provoquant une chaîne de bouleversements et de déséquilibres. L'irrigation se présente tel un médicament, mal dosée, elle devient un poison.

Ces nouveaux problèmes suscitent la nécessité de se référer à la totalité du cycle de l'eau en tant que continuum, tenant compte de l'ensemble des équilibres. Un tel système est certes complexe à analyser mais l'esprit humain prend de plus en conscience et invente les moyens pour une vision d'ensemble afin d'apporter des solutions salutaires.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALBA A. (1957). Rome, début du Moyen Age. Ed. Classique Hachette, Paris. 288 p.
- ARRUS R. (1985). L'eau en Algérie : de l'impérialisme au développement (1830-1962). Ed. OPU, Alger. pp 29-30.
- BAKLOUTI H. (2003). La gouvernance de l'eau et le développement durable. SONEDE, Colloque international de l'eau. Sousse 9-10 oct. 2003. 14 p.
- BÄR R. (2003). L'eau : un enjeux de politique de développement. Symposium, Sans eaux, pas de nourriture. Haute école suisse d'agronomie, Zollikofen.
- BAZZAZ F., SOMBROEK W. (1997). Changements du climat et production agricole. Ed. FAO et Polytechnica, pp1-10.
- BERNADIS, A. M. (1990). Le grand livre de l'eau. Ed. Manufacture et la cité des sciences et de l'industrie. 410 p.
- BOLENS L. (1972). L'eau et l'irrigation d'après les traités d'agronomie andalous au Moyen Age (XI-XII^e siècle). Revue CIHEAM, Option méditerranée. 16 déc. pp 65-77.
- CARLIER M. (1980). Hydraulique générale et appliquée. 2^eEd. Eyrolles, Paris. 556 p.
- MAMOU A. (1988). Les conceptions hydrologiques chez les savants musulmans du moyen âge. In l'eau et le Maghreb. Ed. P.N.U.D. pp 93-102.
- NORDON M. (1992). Histoire de l'hydraulique (2). L'eau démontée du moyen âge à nos jours. Ed. Masson. Paris. 237 p.
- VERMILLION L.D., SAGARDOY J.A. (2001). Transfert des services de gestion de l'irrigation- Directives. Bulletin irrigation drainage n°58. Ed. FAO, Rome. 97 p.
- FAO (2002) <http://www.FAO.Document Repository/eau et agriculture>.