

STRATEAU, UN NOUVEL OUTIL DE PROSPECTIVE SUR LES TENSIONS SUR L'EAU – APPLICATION À LA RECONSTITUTION DES USAGES DE L'EAU EN FRANCE MÉTROPOLITAINE

Pascal MAUGIS⁽¹⁾,
François VALADIER, Ugo PIQUERAS⁽²⁾

⁽¹⁾Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement :

pascal.maugis@lscce.ipsl.fr

⁽²⁾Energies Demain (actuellement à Openvalue) :

francois.valadier@gmail.com,

ugo.piqueras@gmail.com

article accepté par La Houille Blanche (2015)

Les usages de l'eau en France en 2006 ont été reconstitués quantitativement à partir de la connaissance des utilisations finales de l'eau à travers l'outil d'aide à la décision STRATEAU. Les bases de données nationales qui renseignent les activités humaines (démographie, emploi de service, productions industrielles et énergétiques, recensement et production agricole, etc.) permettent en effet de s'affranchir de limitations des données de redevances pour prélèvement, qui sont souvent imprécises et agrégées temporellement et sectoriellement. Les besoins en eau, les demandes associées (modifiées par des choix standards de satisfaction) ainsi que les consommations théoriques sont ainsi calculées et présentées à l'échelle des régions hydrographiques.

Les résultats sont similaires aux déclarations de prélèvements pour redevance des Agences de l'Eau avec une erreur d'environ 5% malgré quelques désaccords liés aux inconsistances des données (notamment les transferts inter-bassin et les usages non référencés) et à l'absence de limitation des demandes théoriques par l'eau disponible. Ils confirment la prédominance des prélèvements pour refroidissement des centrales énergétiques, et celle de l'agriculture pour la consommation d'eau. Les résultats sont mensuels, territorialisés, et déclinés par sous-secteurs. Par ex. pour le secteur agricole, le maïs grain constitue la culture la plus consommatrice d'eau, mais les prairies à irrigation gravitaire prélèvent proportionnellement le plus. Descendre en échelle spatiale demande de mieux connaître les lieux de prélèvement et les itinéraires techniques.

MOTS CLEFS : usages de l'eau, GIRE, outil d'aide à la décision, prospective territoriale, scénarios

Prospecting water tension with the new bottom-up tool STRATEAU – Application to water use in France

Water use in France in 2006 has been quantitatively evaluated from final use data using the decision support tool STRATEAU. Indeed, declarative water-withdrawal tax data, often used for diagnosis, are imprecise and aggregated. Instead, we use national data bases assessing human activity (such as demography, tertiary employment, industrial and power productions, agricultural inventory and yield, etc.), often more precise and systematic to estimate water need, demand and theoretical consumption. A similar approach for water resources could not be achieved due to the lack of data at that scale.

The elementary descriptive mesh is the district, nudged into two aggregating spatial scales (administrative or hydrographic) up to national scale so as to attribute data to their representative scale – here the 24 hydrographic regions. Lower scale water balance is hindered by inter-basin transfer inconsistencies, uncharted usage or misplaced individual industries. Similarly, time-steps are one month and one year. Anthropogenic activities is also available in nudged definitions, following NAF nomenclature, from sectors to very refined categories. Data is therefore used at its best available representative level.

Results confirm the dominance of power plant cooling in water withdrawal and of agriculture in water consumption. Estimates honor tax-related data with a mean error about 5%, hiding higher discrepancies according to sectors of activity and areas. Despite the lack of definite validation data, this good fit comforts the reconstitution method as well as withdrawal data while it indicates ways of progress.

The originality of the results resides in their monthly description, their sub-territorialisation and their refinement over the subsectoral activities. For example with respect to drinking water, domestic usage largely dominates industrial or tertiary ones. With respect to agriculture, effectively irrigated areas have been estimated, as well as withdrawals and evaporative losses. Whence grassland, when irrigated, ranks first as a withdrawer per unit area, whereas grain corn remains the first absolute water consumer.

This approach opens way to refined scenario analysis exploring impacts, for example, of climate change, territorial mutations (urban crawling, agricultural shifts, ...), equipment (leakage control, domestic equipment

or habits, ...) or processes (industrial, chemical, energetic, or agronomic). It would thus allow for trialing strategies on territorial planning, adaptation to climate change or food/energy transitions.

KEY WORDS : water usage, bottom-up approach, IWRM, decision support system

I INTRODUCTION

La gestion intégrée des ressources en eau (GIRE) nécessite, pour le diagnostic territorial, la prospective, la consultation du public ou encore pour la négociation avec les porteurs d'enjeux de disposer d'informations communicables, synthétiques et suffisamment précises pour permettre une analyse stratégique inter-sectorielle ou par filière [Burstein et Holsapple, 2008]. Le bilan du grand cycle de l'eau comporte les usages anthropiques et naturels d'une part, et les ressources en eau (stock renouvelable, flux naturels et transferts) d'autre part. Si des études à l'échelle de bassins versants spécifiques apportent ponctuellement ou exceptionnellement une réponse à ce besoin d'information, force est de constater que, dans la plupart des cas, cette dernière se révèle lacunaire, imprécise, éclatée parmi plusieurs acteurs, d'échelles et de formats divers... et permet difficilement une analyse quantitative pertinente des usages et des ressources. Par ex., les données de prélèvement pour redevances des Agences de l'Eau étaient, jusqu'à 2006, en partie estimées (les compteurs d'eau n'étant pas systématiques), déclaratives et parfois biaisées (sur- ou sous-déclarées), voire forfaitaires, corrigées à l'aide de méthodes différentes selon les territoires et les opportunités [Dubois, 2012 ; communication personnelle] ; en somme difficilement utilisables dans le cadre de travaux scientifiques ou à enjeu.

Les outils d'aide à la décision peuvent apporter un complément précieux à la GIRE [Volk et al., 2010]. Cet article présente plus particulièrement des avancées en termes de gestion quantitative sur les diagnostics et analyses territoriales approfondies (situation contemporaine, conception et évaluation de scénarios d'aménagement territoriaux, impact et adaptation au changement climatique, ...) ainsi que sur la communication interactive (partage d'information, participation des porteurs d'enjeu, négociation, formation). Les retombées sont attendues à différentes étapes d'un projet : sensibilisation, identification des problèmes et des besoins ; élaboration de diagnostics, stratégies et sélection d'options ; et coordination, recherche d'accord, finalisation du plan de bassin.

Strateau est un outil d'aide à la décision conçu à l'origine pour accompagner et stimuler les politiques de gestion de l'eau dans les pays Méditerranéens, soumis à des stress hydriques chroniques [Oki et Kanae, 2006 ; Collins et al., 2009] que le changement climatique menace d'aggraver [Terray et Boé, 2013]. Il a ainsi été testé sur trois bassins versants tests (Maroc - Souss-Massa, Palestine – Al Auja, France - Têt) [Guibert, 2012] puis, devant le constat des importantes tensions sur les usages de l'eau en France-même [op. cit.], sur l'ensemble du territoire métropolitain, pour être présenté comme "solution" au Forum Mondial de l'Eau à Marseille en 2012. Il rassemble trois fonctionnalités :

- diagnostiquer les usages et ressources en eau sur un territoire de façon territorialisée et interactive sur une plate-forme internet centralisée ;
- reconstituer les usages de l'eau ;
- établir une série d'indicateurs de stress hydriques ou d'efficacité d'usage pour différents scénarios territoriaux (climat, équipement, stratégie agricole, démographie, etc.).

Le présent article s'attache à présenter les résultats du second point dans l'implémentation sur la France entière.

La première partie présentera le principe du modèle de reconstitution ainsi que ses hypothèses importantes et les limites de l'outil, ainsi que les particularités liées à son implémentation sur la France. Les données utilisées pour la reconstitution des usages et les spécificités de reconstitution de chaque secteur seront présentées en deuxième partie, en insistant sur les incertitudes associées à leur utilisation. La troisième partie présentera les résultats aux échelles spatiale, temporelle et sectorielle permises par la précision des données. Ceux-ci seront comparés, après agrégation temporelle et sectorielles, aux estimations issues des données de redevances pour prélèvement des Agences de l'Eau.

II DESCRIPTION DU MODÈLE GÉNÉRAL

II.1 Concepts généraux

Une des particularités principales de Strateau, et l'un de ses avantages, est l'imbrication simultanée des échelles. Chaque variable est disponible simultanément à toutes les échelles. Il y en a de trois sortes : l'échelle spatiale, agrégeant la maille élémentaire à plusieurs niveaux emboîtés ; l'échelle temporelle ; et l'échelle d'activité, par secteurs emboîtés. Les données sont entrées à leur échelle de connaissance. Les valeurs sont affectées à leur échelle de détermination, puis désagrégées (au prorata des superficies pour les variables extensives) jusqu'à l'échelle de la maille élémentaire. Si des échelles intermédiaires ont déjà été documentées, l'arbitrage se fait manuellement au bénéfice de la source considérée comme la plus fiable. Ainsi, on valorise les données à leur échelle maximale de représentativité et de fiabilité, tout en comblant les lacunes par des valeurs moyenne par défaut. Le modèle est ainsi capable de fonctionner avec des spécifications initiales très lâches, et de s'enrichir progressivement à mesure que la connaissance des territoires s'affine ou que les données deviennent disponibles.

Le pas de discrétisation temporelle est mensuel de façon à accéder aux dynamiques saisonnières, indispensables pour capturer les périodes de tensions comme les étiages estivaux ou hivernaux. L'échelle spatiale et ses agrégations successives sont arbitraires, l'enjeu étant d'affecter correctement usages et ressources aux mailles élémentaires. L'échelle hydrographique privilégie les ressources de surface, tandis que les échelles administratives privilégient la gestion des usages. Aucune d'elles n'est cependant adaptée *a priori* aux nappes souterraines, et les connexions inter-bassins requièrent de toute façon d'élargir la vue à la gestion inter-bassin voire trans-frontalière.

Les ressources en eau sont déclinées sur leurs différents compartiments, la pluie efficace en étant l'origine ultime : les rivières, ainsi qu'une ou plusieurs nappes. Se situant en aval des modèles spécialisés de calcul des ressources en eau, et également eu égard à la difficulté de décrire de manière homogène les interactions avec les aquifères, Strateau ne considère pas de stocks interannuels, mais seulement des flux : entre ressources (routage en rivière, transferts entre rivières), entre compartiments (relations nappes-rivières, échanges entre nappes, s'ils sont connus) ou encore avec les usages. Cette description par les flux est cohérente avec le choix d'élaborer un outil stratégique ayant pour objectif principal de "valider" la ventilation des usages à travers leur adéquation, dans la durée, avec les ressources renouvelables. Strateau dans cette version ne priorise donc pas les usages (contrairement à la version utilisée pour le projet Explore 2070 [BIPE 2012]), l'adéquation entre usages et ressources faisant l'objet de bilans annuels. Un bilan négatif – tenant éventuellement compte de débits environnementaux – témoigne d'une pénurie d'eau pour le scénario considéré. Il ne s'agit donc ni d'un outil pour la gestion au jour le jour de la ressource ou des réservoirs, ni d'un instrument d'allocation de la ressource aux usagers, mais plutôt d'un outil de prospective.

Les lacs et réservoirs de barrage sont des éléments déterminants de la gestion de l'eau à l'échelle saisonnière et pluri-annuelle que l'on peut assimiler à des règles de transfert différé dans le temps. Ils sont délicats à implémenter dans un modèle car ils sont souvent associés à plusieurs usages, et leur opération résulte d'arbitrages variables et hétérogènes. Hormis les rares cas où la gestion des barrages suit des règles prédéfinies reproductibles (comme les Grands Lacs de Seine), ou ceux où les déterminants de stockage/relargage ont fait l'objet de caractérisation poussée sur un territoire [Hendrickx et Sauquet, 2030], les barrages défient en général les capacités de représentation des modèles hydrologiques. Ils sont implémentés par défaut dans Strateau en une règle simple spécifiant le pourcentage de flux entrant relargué chaque mois. Enfin, les variations de stock dans les installations (hors réservoirs) et les plantes étant très faibles au regard des flux naturels, elles sont négligées.

Les usages, tels que décrits par la nomenclature NAF, sont classés en cinq grandes familles : résidentiel, agriculture, industrie, énergie, tertiaire, dont les besoins en eau sont estimés par autant de méthodes différentes.

Bien qu'il puisse être installé sur des ordinateurs individuels, Strateau est conçu pour fonctionner de manière centralisée, les bases de données et le moteur de calcul étant installés sur un serveur, interrogeable à distance via une application internet ne nécessitant pas de ressource locale. Ceci permet en outre de sécuriser des données souvent sensibles et de faire bénéficier à tous des mises à

jour de la base de données ou des fonctionnalités. L'interface est basée sur Arctique[®], qui offre des facilités pour construire et gérer des scénarios en agissant sur des paramètres sélectionnés, ainsi qu'une visualisation interactive territorialisée de cartes, tableaux spécialisés ou de synthèse, et graphes suivant des modèles précréés.

II.2 Reconstitution des volumes prélevés par les différents secteurs

Les prélèvements en eau sont reconstitués de façon « bottom-up » (par le bas) en plusieurs étapes aux échelles les plus fines, c'est-à-dire après désagrégation en espace, temps, et secteurs d'activité élémentaires, puis ensuite agrégées selon les besoins aux échelles territoriales, annuelle ou par sous-familles et familles d'activité.

Les *besoins* en eau sont définis comme la quantité d'eau nécessaire pour que l'usage soit satisfait à 100%. Leur reconstitution dans chaque secteur aux échelles les plus fines dépend de déterminants finaux (par ex. une production industrielle ou un taux d'activité) ainsi que des besoins unitaires (par ex. l'eau nécessaire pour fabriquer 1 litre de soda) modulées par les taux d'équipement (économique, normal ou haut) et des facteurs exogènes (comme le climat). Le choix de ces déterminants et des paramètres contrôlant la conversion en besoins en eau dépend étroitement du contexte naturel (climat, densité et débit des rivières, présence de nappes, ...), de la spécialisation des activités (typologie agricole, procédés industriels, ...), des habitudes culturelles (usage de l'eau d'hygiène ou récréatif, ...), ou encore des données disponibles (diversité, précision, fiabilité). Le volume de la base de données finale guide également le niveau de détail de ces descriptions.

La *demande* en eau est le besoin de l'utilisateur final sur le lieu d'usage, après la prise en compte de son comportement. La *fourniture* effective est la quantité d'eau disponible pour l'utilisateur final au lieu d'usage (si la ressource est suffisante, la fourniture est égale à la demande en eau). Les *prélèvements* correspondants, effectués éventuellement à distance, sont la quantité d'eau douce extraite d'une source souterraine ou de surface, de manière permanente ou temporaire, moyennant des *fuites* et *rejets* qui retournent à une ressource naturelle respectivement avant et après usage. On appelle ici *pertes* l'eau ne retournant pas au cycle continental annuel, perdue (le plus souvent par évaporation) pendant le trajet entre les prélèvements et les rejets à la ressource naturelle. La *consommation* en eau d'un usage est la quantité d'eau perdue après fourniture :

$$\text{Consommations} = \text{Prélèvements} - (\text{Rejets} + \text{Fuites} + \text{Pertes d'acheminement}) \quad (1)$$

II.3 Spécificités de l'implémentation sur la France

La France est dotée d'un maillage serré de 36 000 communes, qui, divisées selon les bassins versants qu'elles intersectent, constituent les mailles élémentaires de discrétisation. La France est découpée, selon les frontières hydrographiques de la base de données Carthage, en 4 niveaux de données imbriqués : les régions hydrographiques (au nombre de 24, Cf. Figure 2, et qui forment la première échelle de division des 6 grands bassins versants français), les secteurs, les sous-secteurs (302), les zones (6000). Seuls les trois premiers ordres ont été retenus par souci de lisibilité. Un autre axe d'agrégation administrative (département, région, national) a également été implémenté.

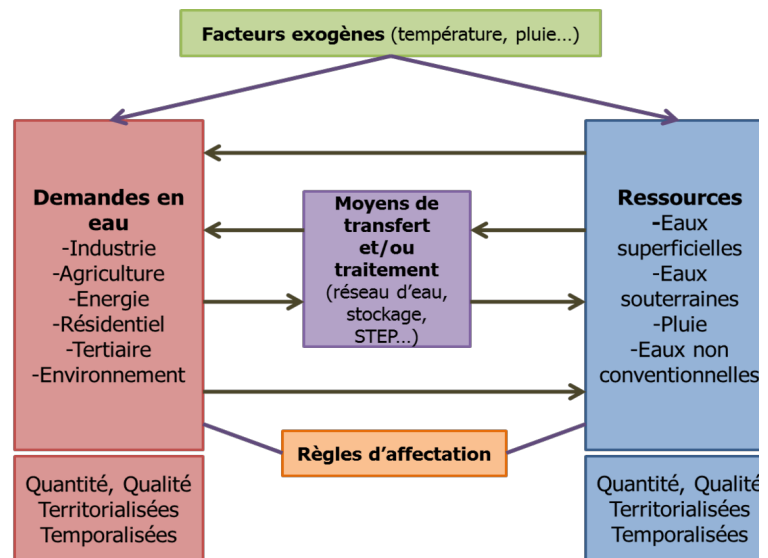


Figure 1: Bilan massique et règles d'affectation entre les demandes et les offres

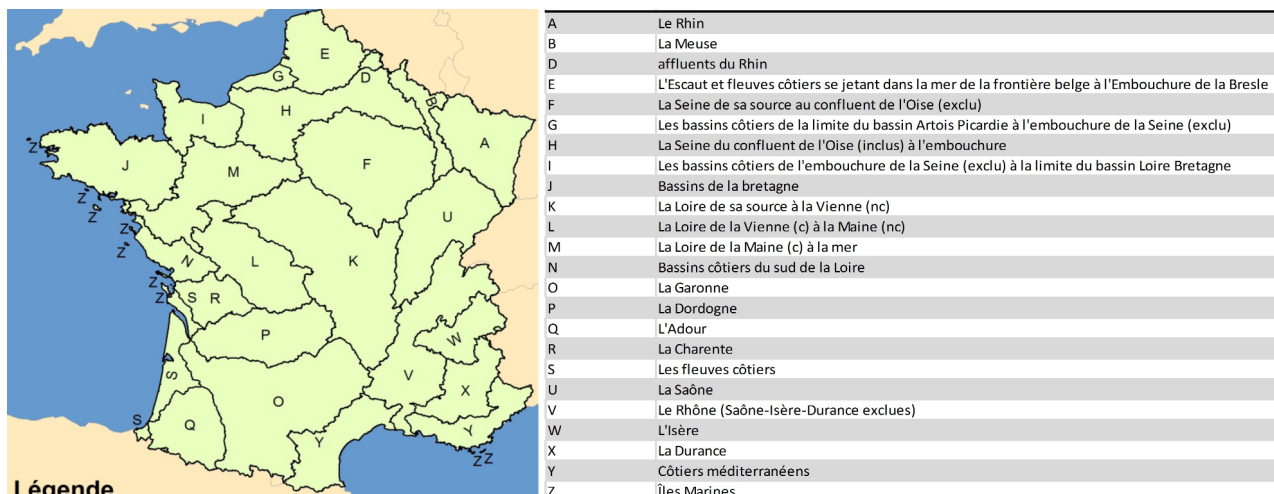


Figure 2: Les 24 régions hydrographiques du territoire métropolitain.

La Corse est incluse en zone Y.

On présente ici les résultats de l'année 2006, pour laquelle les données sont les plus pertinentes (Cf. infra). Cette année, humide météorologiquement, est indicative de la fourchette haute des demandes en eau, dans la mesure où les ressources ont été disponibles favorablement pour les usages en place. En outre, 2006 bénéficie des améliorations engagées vers un équipement systématique des prélèvements par des compteurs d'eau.

Secteur	Source de données	Déterminants
Résidentiel	Recensement général de la population (INSEE)	population, type d'habitat, typologie de commune...
Agriculture	Recensement général agricole (RGA) modèle de reconstitution des besoins en eau de la FAO	assolements, assolement irrigués modèle de calcul, valeurs des coefficients culturaux
Energie	Electricité de France, Réseau de transport d'électricité	Localisation, puissance installée, type de combustible et de refroidissement ; énergie électrique produite (pour les centrales thermiques)
Industrie	Base SIRENE (INSEE) selon la Nomenclature d'Activité Française NAF	nombre d'emplois, pour reconstituer la production industrielle
Tertiaire	Base SIRENE (INSEE) selon la Nomenclature d'Activité Française NAF	nombre d'emplois pour reconstituer le tourisme et les déterminants des établissements éducatifs, sportifs etc...

Tableau 1: Bases de données et déterminants principaux pour reconstituer la demande en des différents secteurs

Le Tableau 1 présente l'origine et la nature des principaux paramètres permettant d'estimer la demande. On s'appuie autant que possible sur les déterminants amont à la production de chaque activité (comme l'emploi, ou les superficies agricoles) afin de pouvoir établir des scénarios d'usage ou d'efficacité hydrique, par opposition à des déterminants de production (comme un tonnage de blé). Une exception notable concerne l'énergie pour les centrales thermiques, où les facteurs contrôlant la demande sont trop complexes et demanderaient un outil dédié à cette seule estimation. On s'appuie alors sur l'énergie produite, sachant que cette valeur ainsi que les choix technologiques de productions pourront faire l'objet de scénarisation.

III IMPLÉMENTATION DES DONNÉES NATIONALES

La France bénéficie d'une surveillance des activités économiques étendue sur les différents secteurs d'activité qui ont servi de base à la reconstitution des prélèvements. Elles sont nombreuses et d'origine diverses. Le Tableau 2 en présente les principales. Malgré le volume de données très conséquent, la chaîne permettant d'établir la demande hydrique doit être complétée.

III.1 Secteurs Résidentiel, petites industries et tertiaire

Les secteurs domestiques et de service, ainsi que les petites industries prélevant leur eau dans le réseau d'eau potable (AEP) sont estimées avec des méthodes spécifiques (Cf. Tableau 2). Ils seront regroupés dans la catégorie "eau potable" pour être comparées avec les données de Redevance

La demande résidentielle est déterminée par le nombre d'habitants par type de logement (maison ou appartement) par commune. Le besoin en eau de chaque habitant d'un habitat type est la somme des consommations unitaires associées aux différents postes : douche, WC, lave-linge, lave-vaisselle, cuisine, jardin, piscine... selon un type de consommation « éco », « normale » ou « haute », attribué selon les taux d'équipement des logements considérés. Le taux de présence des habitants par mois rend compte des migrations saisonnières et permet de ventiler cette consommation sur l'année.

Les demandes AEP des petites industries et du secteur tertiaire sont toutes deux déterminées par le nombre d'employés selon les secteurs d'activité. L'INSEE fournit le nombre d'emplois par commune et par secteur. Les consommations d'eau par employé sont estimées par une bibliographie extensive et dispersée. Alternativement, une production peut être spécifiée auquel cas il convient de définir le coût hydrique par quantité de matière produite (par ex. en m³/tonne d'acier ou par nuitée dans le cas des hôtels). La ventilation sur l'année suit le taux mensuel d'activité de chaque secteur.

Les données sur les fuites dans les réseaux concernent en fait le différentiel entre eau produite, et eau comptabilisée. Il rend bien compte du retour aux ressources et de l'évaporation d'eau s'échappant des réseaux, mais aussi des usages non comptabilisés (eaux de vanne, eau incendie, eau d'arrosage ou de nettoyage urbain, etc.) certes de moins en moins nombreux, mais encore répandus en 2006. Par conséquent, un double compte de ces deniers usages est possible quand ils sont modélisés en parallèle en termes de demande (ex. : jardins publics). Cela n'a pas été tracé mais, sans en nier un impact local possiblement significatif, les volumes en jeu sont relativement faibles à grande échelle. On utilise l'estimation réalisée par le BIPE (2012) pour le projet Explore 2070, qui donne des taux de fuites dans les réseaux pour 99 bassins versants français entre 20 et 34% avec une moyenne nationale de 27%.

III.2 Secteur agricole

Les besoins agricoles demandent une approche plus complexe, car la seule connaissance des variétés cultivées et des superficies agricoles ne suffit pas à estimer les besoins, qui sont fortement modulés par la disponibilité d'eau d'irrigation. Cette dernière dépend de l'équipement des parcelles en irrigation, qui est relativement bien documenté quoique sans doute sous-estimé, ainsi que de leur usage effectif. Or, ces équipements peuvent être sous-utilisés en raison des restrictions des prélèvements, d'indisponibilité de la ressource à un coût énergétique rentable, ou des situations croissantes où l'eau est partagée entre irrigants. Le besoin en eau des plantes elles-mêmes est estimé théoriquement à partir de la connaissance du parcellaire cultivé, sur lequel est ventilé la production agricole départementale. Le modèle CropWat de la FAO [Allen et al., 1998] estime l'évapotranspiration journalière maximale (ETM_j) des cultures à l'aide de la loi classique de Penman-Monteith, assortie de coefficients cultureux pour chaque cultivar et documentée par les données météorologiques SAFRAN de Météo-France [Durand et al. 1993] agrégées à la maille élémentaire. On suppose une satisfaction du besoin hydrique de 100% pour ce diagnostic. Le différentiel entre ETM_j et précipitations, intégré sur le mois, constitue le bilan hydrique (BH) agro-climatique mensuel. Un BH déficitaire correspond au *besoin* en eau, qui est converti en une *demande* au prorata des superficies équipées en irrigation et de l'efficacité des systèmes d'irrigation.

Cette comptabilité inclut les prairies pour fourrage ou pacage, nommées aussi "surfaces toujours en herbe" (STH), ainsi que les vignes et vergers. Les forêts – naturelles ou gérées – consomment d'importantes quantités d'eau pluviale et doivent aussi être intégrées dans le bilan dans la mesure où la prospective peut inclure la déforestation ou l'afforestation de terres. Cependant, elles n'opèrent pas de prélèvement significatif ou documenté dans les rivières ni les nappes, et sont rarement irriguées. Pour ces raisons, elles ne seront pas diagnostiquées ici.

L'irrigation est pratiquée en France selon trois modalités : gravitaire (par ruissellement de surface via canaux et rigoles), par aspersion (jet rotatif, ou brumisation verticale, plus efficace) et par apport localisé (goutte-à-goutte pour le maraîchage ou micro-jet pour l'arboriculture), comptant respectivement pour 4%, 90% et 6% des surfaces irrigables nationales et des efficacités moyennes de 50%, 75% et 85 % \pm 5 %. On suppose ici pour simplifier et faute de caractérisation extensive, que l'inefficacité est intégralement due à des pertes évaporatives sans rejet vers la ressource. L'irrigation gravitaire s'accompagne d'un prélèvement excessif restitué à l'exutoire des canaux et qui n'est pas quantifié ici. La répartition des modes d'irrigation se base sur les statistiques cantonales de 2000 affectées statistiquement aux cultures en interdisant certaines combinaisons (*i.e.* un mode gravitaire pour les prairies hors Plaine de la Crau, ou le goutte-à-goutte pour le maïs).

III.3 Secteur industriel

Les productions industrielles – hors petites industries - sont calculées en moyenne nationale à partir des productions annuelles et du nombre d'employés sur le Territoire, puis réparties dans les communes en fonction du nombre d'employés recensés sur chacune d'elles et dans chaque branche.

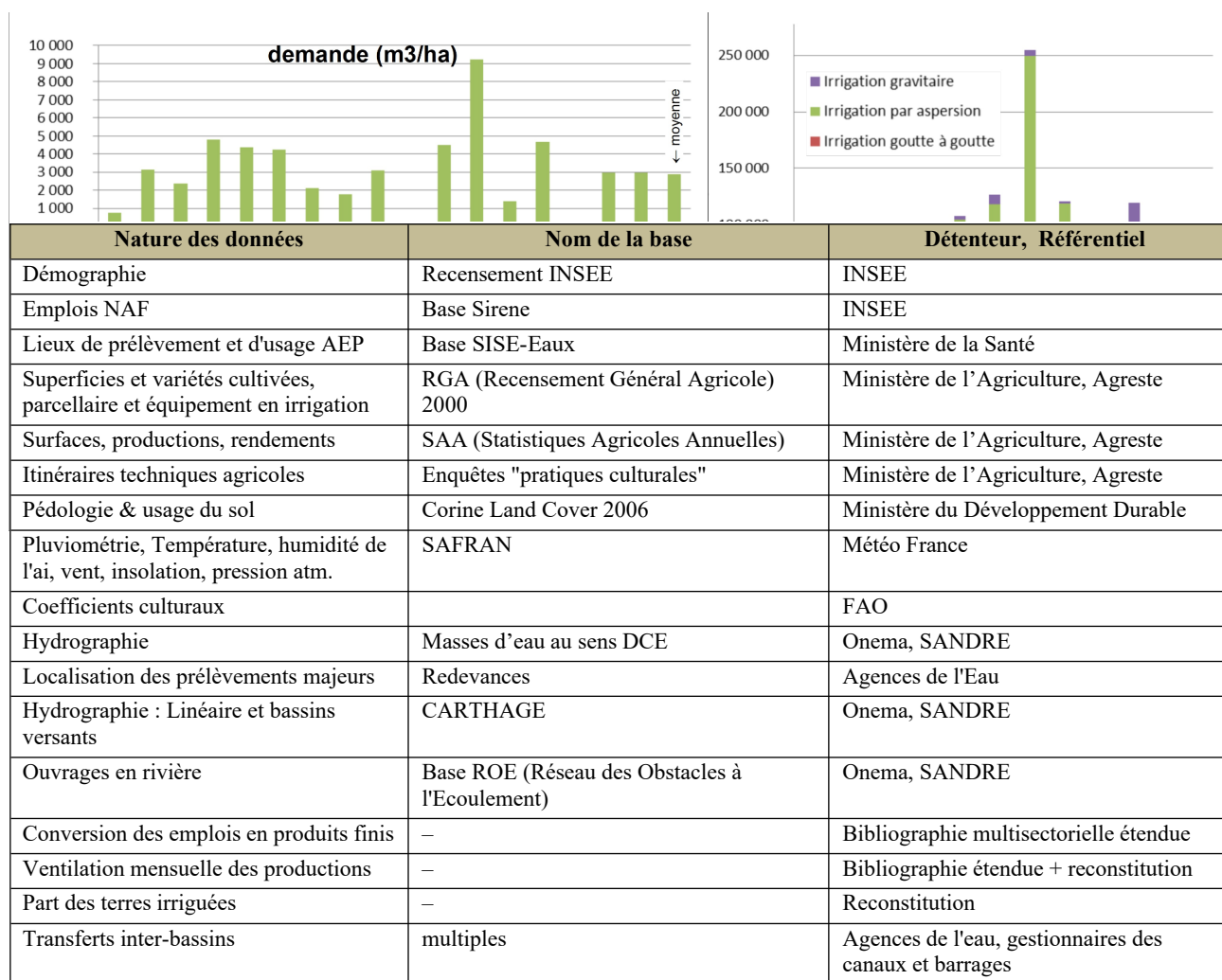


Tableau 2 : **Origine des principales données utilisées.** Chaque base peut couvrir un champ large et varié d'information qu'on ne peut détailler ici. Le "Référentiel" indique, quand il existe, le macro-dispositif de gestion de bases de données.

En l'absence de base de donnée, certaines informations essentielles ont été tirées de la littérature internationale ou reconstituées. L'information peut aussi être éclatée auprès de multiples acteurs.

Une bibliographie étendue (articles scientifiques et, le plus souvent, rapports techniques) a permis de documenter les volumes d'eau consommés et rejetés pour les productions unitaires des produits finis (une voiture, 1l de soda, ...) de chaque filière industrielle. Le produit de ces deux informations donne la demande annuelle en eau par commune et par secteur, affectée au point de prélèvement industriel indiqué dans la base de donnée Redevances des Agences de l'Eau, et ventilée mensuellement à l'aide du taux d'activité fourni par l'INSEE.

III.4 Secteur énergétique

Afin de reconstituer les prélèvements en eau du secteur de l'énergie, chaque centrale thermique (à énergie nucléaire ou fossile) est localisée sur le territoire et caractérisée par le nombre et la puissance effective des réacteurs qui la constituent ainsi que par le type de refroidissement. Les circuits dit "ouverts" ont pour source froide l'eau d'une rivière, prélevée en quantité, à laquelle est restituée l'eau réchauffée en aval du tronçon court-circuité. Les pertes par évaporation en rivière induite en aval sont relativement faibles quoique significatives dans l'absolu (jusqu'à 0,4 m³/s / GW électrique produit ; environ 0,7% de l'eau prélevée). En l'absence de consensus dans la littérature sur ces pertes, on les négligera cependant. En système dit "fermé", des tours aéroréfrigérantes rafraîchissent la source froide par évaporation. Les débits nécessaires sont plus faibles mais la consommation relative est élevée (environ 33% en moyenne en France, soit 0,7 m³/s / GWe produit). Les quantités évaporées dépendent du climat ainsi que du fonctionnement effectif des centrales. On s'est appuyé dans cette étude sur les taux nominaux plutôt que sur leurs productions effectives. Les prélèvements sont affectés à la commune sur laquelle se situe la centrale, pour la ressource concernée, et répartis sur l'année en fonction du taux mensuel d'activité des centrales.

D'autres générations d'énergie existent comme la valorisation énergétique des déchets, les éoliennes, les centrales thermiques à refroidissement sec ou marin ou encore le photovoltaïque, mais leur consommation d'eau est marginale en comparaison et elles ont donc été négligées.

La production hydroélectrique est gérée en tant qu'ouvrage de stockage libérant de façon différée les débits entrant. Les fractions mensuelles du débit annuel entrant sont spécifiées (à partir des chroniques observées de débit) pour les principaux ouvrages, les autres plus petits étant négligés. Faute de données ou de règle de calcul utilisables sur l'ensemble du territoire, les pertes évaporatives ont été fixées à 0 dans le cadre de cette étude. Toutefois, l'évaporation des réservoirs, ou la recharge induite des aquifères, peut impacter localement les ressources de manière significative, et, associée au changement climatique ou à la généralisation de retenues, constituer à terme un enjeu de gestion incontournable.

III.5 Transferts inter-communaux et inter-bassins

Une difficulté commune à tous les secteurs est l'attribution du point de prélèvement à un usage donné, parfois très éloigné (la ville de Paris prélève, par ex., l'eau à usage AEP jusqu'à 150 km de distance). Les statistiques par commune ne permettent pas de définir assurément la ressource concernée, assez mal documentée en 2006 et ne faisant l'objet d'aucun référencement national. De plus, de nombreux usages rejettent des quantités d'eau importantes (comme les stations d'épuration ou les canaux d'irrigation), et ce parfois dans des bassins versants différents, sans que ceci soit documenté précisément. Enfin, la localisation de l'usage est souvent référencée à l'adresse de facturation du préleveur, voire de son siège social, parfois très distant de l'usine ou de la filiale utilisant effectivement l'eau.

On procède à l'attribution des lieux de prélèvement associés à un usage donné en recherchant la commune la plus proche dont ce type d'usage est référencé par la Base Redevances. Les gros prélèvements AEP (Marseille, Paris, Lyon...) demandent un calage manuel.

Pour s'affranchir d'une partie de ces biais, dont un grand nombre s'expriment à petite échelle, et rester dans un volume de travail compatible avec cette étude, il a été choisi de se placer à une échelle macroscopique : la Région Hydrographique, et de ne pas rendre compte des variabilités aux échelles inférieures.

Les transferts majeurs inter-bassins, comme par ex. pour le transport fluvial, sont documentés par les Agences de l'Eau. Ils ont davantage un impact sur la ressource que sur les usages étudiés ici.

IV ESTIMATION GLOBALE DES USAGES DE L'EAU EN FRANCE

Météo-France		Modélisation STRATEAU							Remarques
Pluie		Secteurs d'activité	Prélèvements			Consommation			
annuelle	dont été (%)		Annuels (km ³)	dont été (%)	part du total été	annuelle (km ³)	Conso / prélèv	part du total	
895,6 mm 494 km ³	21 %	Energie	18,6	21%	42%	1,1	6%	14%	hors évaporation aval pour circuit ouvert
		Industrie	2,8	26%	8%	0,5	17%	6%	dont Prélèv. AEP = 0,3
		Agriculture	4,2	85%	37%	4,2	100%	54%	hors Conso. pluviale
		Résidentiel	4,2	25%	11%	1,5	37%	20%	AEP
		Tertiaire	1,0	20%	2%	0,4	39%	5%	AEP
		TOTAL	30,9	31%	100%	7,7	25%	100%	Prélèv. AEP = 5,5

Tableau 3: **Prélèvements et consommations théoriques d'eau reconstituées en France pour l'année 2006.** La petite industrie est ici intégrée au secteur industriel et les prélèvements AEP correspondants sont indiqués séparément en km³.

Les prélèvements estivaux impactent généralement plus intensément la ressource saisonnière : figurent ainsi pour chaque secteur la fraction prélevée l'été et sa contribution par rapport à tous les prélèvements estivaux. Le ratio Conso/prélèv indique la part de pertes par évaporation de l'eau prélevée sous hypothèse, pour l'irrigation agricole, d'absence de fuites et de rejets.

Le Tableau 3 montre les demandes totales annuelles à l'échelle nationale. Le refroidissement des centrales thermiques est de loin le premier préleveur, y compris en été, mais n'évapore qu'1/7^{ème} du total consommé (potentiellement plus en incluant l'évaporation en aval des centrales à circuit ouvert). Industrie, résidentiel et tertiaire consomment de l'eau potable toute l'année de façon homogène pour un total de 5,5 km³ (soit 17% de l'eau prélevée seulement), mais cela cache de grandes disparités territoriales et saisonnières liées au tourisme. L'irrigation prélève à l'année autant que les usages domestiques, mais concentre sa demande en été, au moment où les ressources sont plus limitées, et évapore l'intégralité de son besoin en eau, ce qui la place au premier rang des consommateurs d'eau avec plus de la moitié de la consommation nationale.

La répartition des prélèvements varie grandement selon les territoires (Figure 4), en particulier lorsque s'y trouve une centrale thermique à circuit ouvert. Après le secteur énergétique, l'agriculture est le préleveur dominant dans la moitié sud du territoire, plus fortement encore au sud-ouest. Ailleurs, les autres secteurs constituent une demande plus modérée dominée par les usages domestiques, qui sont également légèrement supérieurs dans la moitié nord. Les principaux préleveurs industriels sont l'industrie chimique (20%), l'industrie du papier et du carton (15%), la fabrication de produits en caoutchouc et en plastique (14%) et l'industrie pharmaceutique (11%).

L'eau consommée théorique montre une répartition très contrastée (Figure 5a). L'agriculture domine la consommation d'eau sur les 2/3 sud de la France, mais reste derrière l'énergie dans le bassin du Rhône et la Plaine d'Alsace (derrière l'énergie).

La culture du maïs en est le premier contributeur sur une large diagonale SO-NE, ainsi que le maraîchage, les vergers et les prairies irriguées dans le SE (Figure 5b). Dans les régions où la consommation est minoritairement agricole, l'irrigation est déterminée par d'autres cultures dominantes comme le blé et, plus localement, la pomme de terre et la betterave. Ceci s'explique principalement par l'équipement effectif en irrigation, qui privilégie le maïs et les prairies AOC de la Plaine de la Crau, plutôt que par les volumes demandés à l'hectare (Figure 5). La consommation du secteur résidentiel est majoritaire dans le tiers nord-ouest national, avec une valeur particulièrement forte pour la Seine-amont, qui inclut l'agglomération parisienne.

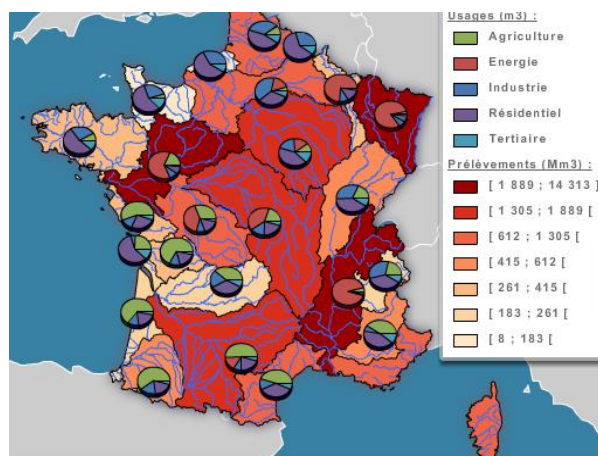


Figure 4: **Prélèvements en eau reconstitués pour l'année 2006 pour tous les secteurs à l'échelle des régions hydrographiques.**



Figure 5: Eau consommée reconstituée (2006) : (gauche) pour tous les secteurs à l'échelle des Régions Hydrographiques ; (droite) détail des consommations agricoles à l'échelle des régions administratives.

V COMPARAISONS AUX DONNÉES DE REDEVANCE POUR PRÉLÈVEMENT

V.1 Les données fiscales de prélèvement

Conformément au code de l'environnement (Art L.213-10-9 et R 213-48-14), les Agences de l'eau perçoivent une redevance des utilisateurs proportionnelle aux volumes annuels prélevés. Les taux de redevance permettent de passer facilement de la valeur monétaire à des volumes d'eau. La déclaration n'est nécessaire qu'au-delà d'un certain volume, fixé par chaque Agence (Par ex. 10 000m³ dans le bassin Rhône Méditerranée, pour un usage professionnel, ou 7 000 m³ en zone de répartition des eaux). Certains usages échappent à la redevance dans le cadre d'une prescription administrative comme l'exhaure d'eaux de mines dont l'activité a cessé, les travaux souterrains, le drainage pour le maintien à sec des bâtiments et ouvrages, l'aquaculture, la géothermie, la lutte contre le gel des cultures, et les prélèvements visant à la préservation d'écosystèmes aquatiques ou à la réalimentation des milieux naturels.

Les dispositifs systématiques de mesure à la prise d'eau sont obligatoires depuis 1992, mais ne couvraient en 2006 que 53% des prélèvements agricoles déclarés. Certains prélèvements sont donc estimés au forfait (par ex. l'irrigation gravitaire), révisable par arrêté, ce qui induit, en plus de stratégies possibles d'optimisation par les irrigants, des sur- ou sous-estimations des volumes effectivement prélevés. Une sur-déclaration permet en effet, dans certains cas de gestion partagée, de préserver des quotas. Le comptage est parfois fait au point d'usage, sans rendre compte alors des fuites et pertes depuis le point de prélèvement. Les pompes illégalement restent une source d'incertitude significative, bien que la situation s'améliore progressivement. De plus, les volumes sont associés à des activités relativement vagues comme AEP ou Irrigation Gravitaire. L'information sur l'usage réel, par exemple hôtel ou résidence principale, maïs ou blé, n'existe pas, pas plus que la répartition au cours de l'année. Dans certaines communes ayant de gros préleveurs peu nombreux, le respect du secret statistique conduit à brouiller l'information en redistribuant les valeurs pour préserver l'anonymat.

V.2 Principe de la comparaison et limites

Les prélèvements en eau reconstitués sont comparés aux données de Redevance, selon les grands secteurs d'activité, et de manière territorialisée. Les estimations sont donc agrégées à l'échelle de l'année, par secteur (résidentiel, petite industrie et tertiaire ayant été regroupés pour l'occasion) et par Région Hydrographique. Étant données les incertitudes importantes entachant les deux estimations, il ne s'agit pas tant de valider l'une ou l'autre que de valoriser les points de convergence et de mettre en lumière les précautions à prendre pour les interpréter, voire de proposer des pistes d'amélioration de la connaissance des usages de l'eau.

V.3 Résultats et critique

A l'échelle nationale, la présente reconstitution est globalement inférieure aux prélèvements déclarés de 4%, se répartissant entre -6% pour l'AEP, -11% pour l'agriculture, -4% pour l'industrie et -2% pour l'énergie. Ce très bon accord cache des disparités importantes à l'échelle des régions hydrographiques (Cf Figure 6). On constate des sous-estimations relatives importantes en Rhône-Méditerranée (régions V, W, X et Y) et des surestimations significatives en volume pour la Seine-amont, la Loire et la Garonne. Ces différences et leur interprétation s'expriment différemment selon les secteurs et les régions.

Les prélèvements d'eau pour l'AEP sont bien reconstitués en termes de volume si ce n'est pour une sur-estimation dans les bassins méditerranéens (V, X, Y). L'analyse à partir de données complémentaires [MEEDDM ; 2004] tend à incriminer une demande en eau domestique localement inférieure à la moyenne nationale qui avait été retenue sur tout le territoire. Ceci laisse à penser que les tendances dues à l'usage de rafraîchissement (piscines, douches) et à l'auto-limitation s'y compenseraient favorablement, et ce en dépit d'une légère sous-estimation des fuites. Cependant, l'incertitude d'imputation des prélèvements industriels au réseau AEP ou au milieu naturel pour les petites industries induit également des erreurs de reconstitution, qui se répercutent sur les deux secteurs AEP et industriels tout en se compensant globalement.

Les écarts principaux entre estimations proviennent de la demande agricole. Les valeurs majorantes sur les 10 régions concernées, où l'irrigation est essentiellement par aspersion, ne pourrait que partiellement s'expliquer par une efficacité sous-estimée (fixée ici à 75%). Une auto-limitation de la demande (par ex. à 80% de l'ETM) est un facteur possible, ainsi que des estimations par redevances sur-estimées car forfaitaires (comme c'est le cas de l'intégralité du bassin du Rhin) ou encore la surestimation, dans la base Redevances, des superficies effectivement irriguées et non simplement irrigables. L'erreur d'affectation des prélèvements pour les communes à la frontière entre deux régions contribuent aussi aux erreurs d'estimation (ou, à plus grande échelle, l'irrigation du bassin du Rhône profite de l'eau prélevée à la Durance et au Verdon en sortie des canaux ou via leurs fuites), et génèrent en contrepartie des minorations de la demande ailleurs. A cette source de minoration – extrêmement marquée dans les bassins méditerranéens (X et Y) – s'ajoutent plusieurs facteurs : d'une part une efficacité de l'irrigation gravitaire possiblement plus faible que prévue (fixée ici à 50% et déterminante pour ces bassins), d'autre part le manque de fiabilité des données de redevances qui sont estimées par jaugeage sur écoulement libre pour l'irrigation gravitaire qui constitue plus de 80% du volume estimé pour les redevances dans ces bassins. La règle d'attribution du type d'irrigation aux cultures, faite au prorata des équipements, conduit également à sous-estimer l'usage de l'irrigation gravitaire, moins onéreux et sans doute utilisée en priorité.

Les prélèvements industriels sont bien représentés globalement. Cependant les données complémentaires pour 2007 [communication SOeS] suggèrent une sous-estimation importante des industries chimique et alimentaire (respectivement 38% et 22% l'année 2007). Bien que ces chiffres correspondent à l'année suivante et à une méthodologie non explicitée, ceci suggère, outre la difficulté d'allocation des points de prélèvement déjà mentionnée, une mauvaise reconstitution de la production industrielle associée ou une caractérisation hydrique imparfaite des procédés.

Étant donnée le faible nombre d'usines électriques majeures en France, la comparaison peut se faire avec plus de pertinence à l'échelle des communes concernées. Les erreurs d'estimations sont relativement faibles pour les prélèvements importants, ce qui se répercute toutefois en des volumes significatifs comme pour les bassins du Rhône et du Rhin, très équipés en centrales nucléaires. En revanche, l'erreur peut monter jusqu'à 20% pour les plus petits prélèvements, parfois non référencés en tant qu'industrie énergétique (comme le réacteur Phénix ou les petites unités) et donc ignorée par la reconstitution. On rappelle ici qu'aucune des estimations n'intègre les prélèvements et pertes par évaporation des barrages hydro-électriques.

VI CONCLUSIONS ET PERSPECTIVE

Il est désormais acquis que la gestion quantitative de l'eau doit s'appuyer fortement et prioritairement sur le contrôle et la réduction des demandes en eau. La gestion intégrée se doit de surcroît d'être multi-sectorielle, en croisant et harmonisant les demandes des différents secteurs : résidentiel, agricole, industriel, énergétique en particulier, avec le souci de satisfaire les autres usages peu ou pas consommateurs d'eau que sont l'environnement, le tourisme, le transport, etc.

La méthodologie proposée ici pour reconstituer les prélèvements et consommation d'eau à partir des informations sur les usages a montré sa capacité à rendre compte des différents usages à l'échelle de la France entière. L'échelle de diagnostic, celle des grandes régions hydrographiques ou administratives a été imposée par la pertinence des données, notamment la connaissance des lieux d'usages et de prélèvement. Mieux les connaître représente un défi, mais il est possible de descendre à de plus hautes résolutions, à la fois temporelle et spatiale sur des territoires plus finement caractérisés. Le principe de l'emboîtement d'échelles simultanées y est adapté et permet des va-et-vient entre échelles en fonction des enjeux et de l'information disponible.

Malgré l'absence de calage initial des paramètres permettant de convertir l'activité des différents secteurs en besoins en eau, l'accord avec les données fiscales de prélèvements de 2006 – année moyenne mais bien documentée – est très bon. Des différences subsistent qui sont imputables principalement à la méconnaissance fine des usages, ainsi qu'aux incertitudes dont souffrent les données de redevances. En effet, malgré la variété exceptionnelle des données sur les activités économiques et leur croisement, pour la première fois, dans une plate-forme et sous une forme unifiées, de nombreuses imprécisions de connaissance subsistent qui ont un impact fort sur la capacité à reproduire exactement les prélèvements en eau. Des pistes d'amélioration ont été proposées pour chacun des secteurs. Le modèle, STRATEAU, pourrait bénéficier d'un calage de ses paramètres, mais il a montré son potentiel pour décrire la complexité des usages de l'eau en France, après en avoir exhibé les déterminants. Le principe de l'estimation bottom-up ouvre le champ des prospectives sur les activités économiques, les procédés industriels et itinéraires techniques agricoles ainsi que les habitudes de consommation. Adossé à une représentation des ressources, il permettra de diagnostiquer une variété d'indicateurs de stress ou de performance versatile propre à concevoir, partager, mettre en place et évaluer des stratégies d'aménagement territorial, notamment à l'articulation eau-alimentation-énergie.

Le contexte actuel de tensions exacerbées sur l'eau en de nombreux territoires de la Planète, y compris en Europe et singulièrement en France, a conduit à de nombreux conflits à des échelles allant du local au trans-frontalier. Certains constituent simplement une allocation non-optimale de la ressource, mais d'autres se déploient durablement à une échelle régionale, impactant structurellement la géopolitique mondiale. Cette situation appelle à un changement de paradigme dans la gestion de l'eau. L'objectivation des besoins et usages des acteurs de l'eau, ainsi que le partage de données environnementales, tel que nous l'avons proposé ici avec Strateau, permettrait de poser les bases d'une discussion apaisée, préambule à l'élaboration collective d'un projet de territoire respectueux de la question "eau". Une telle démarche permettrait d'avancer vers des solutions durables cohérentes avec les ressources disponibles et responsables vis-à-vis des enjeux à venir tels que nous le préparent les changements globaux, au premier rang desquels le changement climatique qui induira sur les territoires déjà stressés aujourd'hui, à la fois une raréfaction accrue de la ressource et, si les usages ne sont pas réorganisés, une augmentation insoutenable des besoins.

VII REMERCIEMENTS

Ces travaux ont été financés par l'Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques et par les six Agences de l'Eau. Le comité de pilotage du projet regroupait : le Ministère de l'Environnement, du Développement Durable et de l'Énergie, l'Union pour la Méditerranée, Suez-Environnement, Véolia, l'Ambassade de l'Eau (propriétaire de STRATEAU), l'Académie de l'Eau. La réalisation a été effectuée par le bureau d'études Energies Demain. STRATEAU est soumis à la licence des logiciels libres GNU-GPL v3. Nous remercions également Météo-France pour la mise à disposition des données météorologiques. Les résultats détaillés sont disponibles sur demande auprès des auteurs dans le rapport [Piqueras et al. 2012].

VIII REFERENCES

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", Technical Report, *FAO*, Rome.

BIPE (2012). "Rapport Explore 2070, lot 7 - Prospective socio-économique et démographique, Pressions anthropiques", *Rapport MEDDE*.

- Boé J. (2007), "Changement global et cycle hydrologique : Une étude de régionalisation sur la France". *Thèse de doctorat, Université Toulouse 3 Paul Sabatier*
- Burstein F., Holsapple C. (2008), "Handbook on decision support systems 2: variations", *Springer Science & Business Media*.
- Collins R., Kristensen P., Thyssen N. (2009), "Water resources across europe confronting water scarcity and drought. Technical Report 2", *European Environment Agency, Copenhagen*.
- Dubois A.. "Les prélèvements d'eau en France en 2009 et leurs évolutions depuis dix ans" (2012). *Chiffres et statistiques*, **290**.
- Durand Y., Brun E., Mérindol L., Guyomarc'h G., Lesaffre B., and Martin E. (1993). "A meteorological estimation of relevant parameters for snow models". *Annals of Geophysics*, **18**, p65–71,
- Guibert F. (2012). "Technical overview of Strateau - tool for decision making support water supply/demand balance". *MEMBO Workshop, 20th Sept. 2012*.
- Hendrickx, F., Sauquet, E. (2013).- Impact of warming climate on water management for the Ariège River basin (France). *Hydrological Sciences Journal*, **58 (5)**, 976–993.
- MAAP/MEEDDM (2004). "Enquête " Eau et assainissement" des collectivités locales".
- Oki T., Kanae S. (2006). "Global hydrological cycles and world water resources", *Science*, **313(5790)**:1068–1072.
- Piqueras U., Valadier F., Dufossé J., Maugis P. (2012), "Comparaison des résultats de l'outil STRATEAU aux données de prélèvements pour redevances des Agences de l'Eau", *Energies Demain – Onema*.
- Soubeyroux J.M., Kitova N., Blanchard M., Vidal J.P., Martin E., Dandin P. (2012). "Caratérisation des sécheresses des sols en France et changement climatique : Résultats et applications du projet CLIMSEC". *La Météorologie*, **78**: 21-30.
- Terray L., Boé J. (2013). "Quantifying 21st century france climate change and related uncertainties". *Comptes Rendus Géoscience*, **345**: 136–149
- Volk M., Lautenbach S., van Delden H., Newham L.T.H., Seppelt R. (2010). "How can we make progress with decision support systems in landscape and river basin management? lessons learned from a comparative analysis of four different decision support systems". *Environmental Management*, **46(6)**, p 834–849.

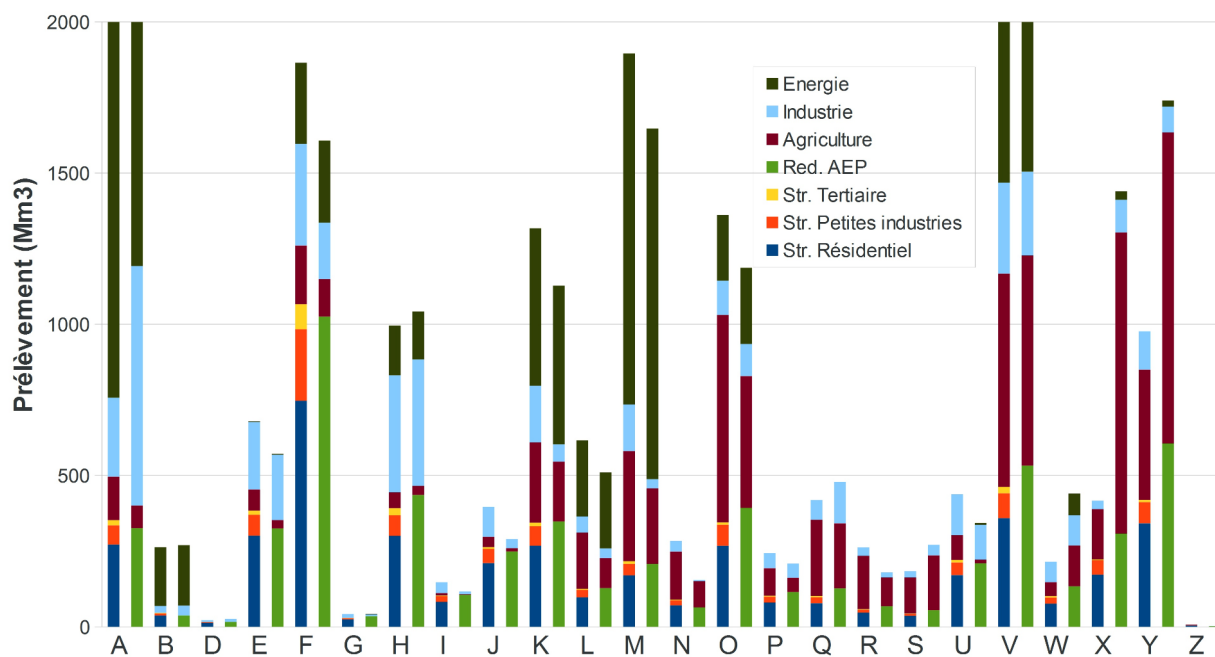


Figure 6: **Comparaison des estimations (gauches) avec les données de redevance (droites)**, globalement, pour chaque région hydrographique (Cf. Fig 2) et pour chaque secteur d'activité. Les prélèvements AEP sont globaux pour les données redevances ("Red. AEP") et détaillées par Strateau selon les trois secteurs contributeurs ("Str.").