

A Concepts et méthodes



- 8 ■ Quelques rappels conceptuels sur la demande en eau potable
- 15 ■ Typologie des méthodes de prévision
- 19 ■ La prise en compte de l'incertitude



1 - Quelques rappels conceptuels sur la demande en eau potable

1.1 Qu'est-ce que la demande en eau ?

Les services publics d'eau potable produisent, transportent et distribuent de l'eau pour satisfaire les besoins des usagers. Les ingénieurs appréhendent souvent la demande en eau comme la quantité de ressource en eau devant être prélevée pour satisfaire ces besoins, en tenant compte des pertes qui ont lieu pendant la production, l'adduction et la distribution. La demande totale est alors définie comme la somme de la consommation facturée et non facturée des différents usagers et des pertes survenant dans les réseaux (Figure 1). Dans cette conception technique de la demande, celle-ci est considérée comme une variable exogène au service, c'est-à-dire qu'elle s'impose au gestionnaire qui doit s'organiser pour la satisfaire. Le terme de demande est d'ailleurs assez peu utilisé dans les études techniques qui lui préfèrent la notion de besoin en eau.

Les économistes ont une conception différente de cette notion de demande. Ils la définissent comme la quantité d'eau que les usagers seront prêts à acheter pour un prix donné. L'utilisateur est supposé pouvoir modifier ses pratiques en fonction du prix de l'eau, par exemple investir dans des équipements moins consommateurs ou changer ses habitudes de consommation (arrosage du jardin, durée des douches). Cette conception implique que le gestionnaire est capable de modifier la demande en jouant sur des leviers incitatifs, comme la tarification ou la sensibilisation. La demande peut ainsi être représentée par une fonction mathématique décrivant la relation entre, d'une part, la quantité totale d'eau que les consommateurs sont prêts à acheter et, d'autre part, les variables qui déterminent cette décision de consommation. C'est cette dernière définition de la demande qui est retenue pour réaliser des prévisions à long terme. Nous verrons plus bas quels sont les facteurs qui entrent dans les fonctions de demande (section 1.4) et comment celles-ci peuvent être établies en utilisant des approches statistiques (section 2.3).

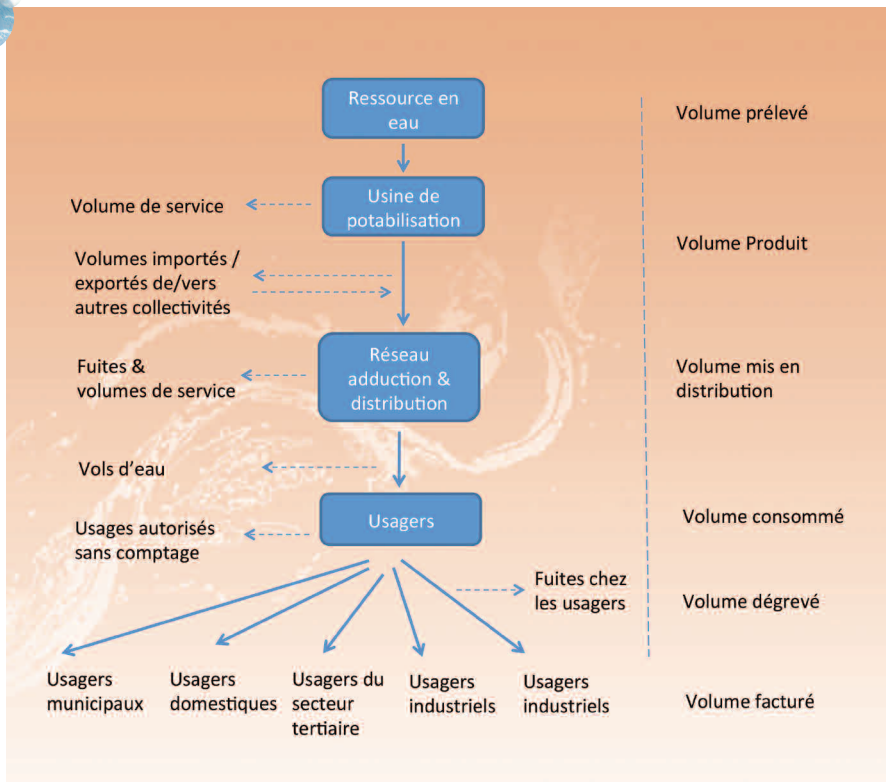
1.2 Les composantes de la demande en eau potable ?

Les services d'eau potable desservent cinq grandes catégories d'usagers : (1) des usagers domestiques et (2) municipaux pour qui l'eau est un bien de consommation final ; et des usagers (3) industriels, (4) agricoles ou (5) du secteur tertiaire (commerce, artisans, hôtellerie...) qui utilisent l'eau comme un intrant dans un processus de production. Ces différents usages ne sont pas présents dans les mêmes proportions dans tous les territoires. Cela explique la grande diversité des valeurs de consommation par habitant sur le territoire national.

Les gestionnaires des services connaissent généralement assez mal la répartition de la demande entre ces catégories d'usagers : leurs bases de données ne sont généralement pas conçues pour recueillir ou analyser cette information avec précision. Le plus souvent, la seule information disponible est une consommation moyenne annuelle par usager, calculée en divisant le volume total facturé par le nombre d'abonnés du service.

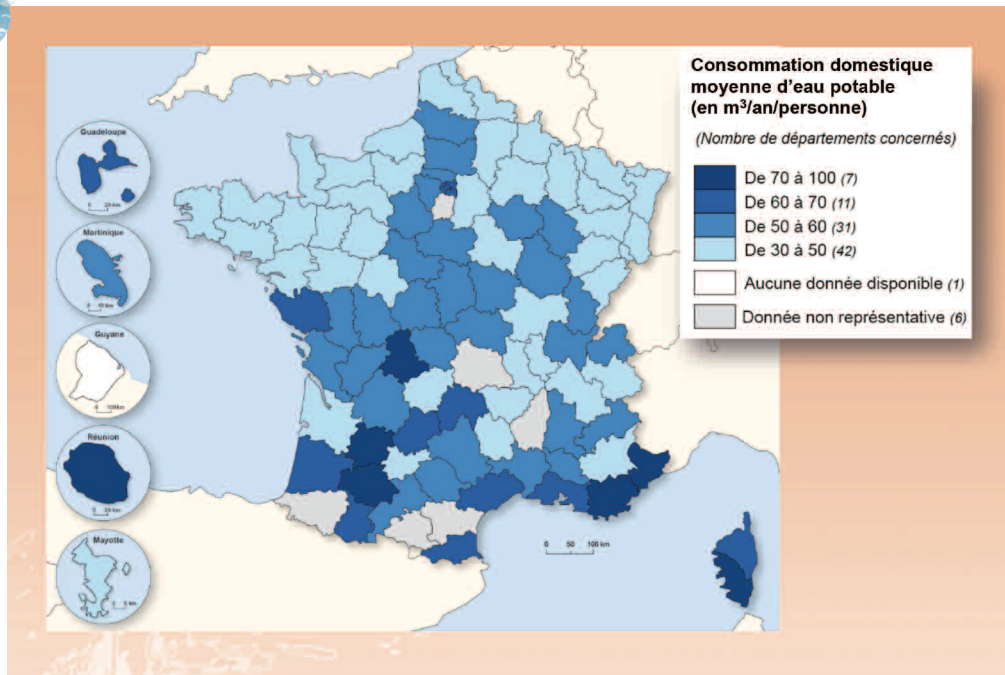
Une connaissance précise de la consommation spécifique par type d'utilisateur est un préalable nécessaire à toute prévision. En effet, les ratios de consommation sont très différents d'un usage à l'autre ou d'une collectivité à l'autre pour un même usage : la figure 2 (page suivante) illustre par exemple la variabilité de la consommation des abonnés domestiques au niveau national. L'estimation précise de ces ratios peut être réalisée à partir des fichiers de facturation, ce qui nécessite de les retravailler pour affecter une catégorie d'utilisateur à chaque client. Cette classification peut être établie soit manuellement, soit en utilisant des procédures automatiques de recherche lexicale. Une étude réalisée par Irstea et le BRGM illustre l'intérêt de ce type d'analyse (Montginoul *et al.*, 2017). En repartant du fichier de facturation, les auteurs ont pu évaluer précisément la répartition de la demande entre ses différentes composantes et calculer des ratios de consommation par type d'utilisateurs. L'application de la méthode aux métropoles de Montpellier et Perpignan montre que les consommations spécifiques peuvent fortement différer dans un même contexte régional. Ainsi, un ménage résidant en maison individuelle consomme 85 m³ par an à Perpignan contre 134 m³ à Montpellier et 57 m³ par an contre 100 m³ pour un appartement dans ces deux métropoles.

Figure 1



Du prélèvement à la consommation. Données 2013, SISPEA. Source : Onema 2016.

L'analyse de la demande peut encore être affinée en établissant des sous-catégories. Les usagers domestiques peuvent par exemple être regroupés en fonction des caractéristiques de leur habitat, lesquelles déterminent fortement les usages extérieurs (arrosage de jardin, présence de piscine, etc.). L'étude Irstea-BRGM à Perpignan et Montpellier a permis de quantifier ces usages extérieurs. En s'appuyant sur des photographies aériennes à haute résolution, les auteurs analysent plus de 30 000 parcelles dans chaque agglomération. Ils estiment le taux d'équipement en piscine à 45 % sur les parcelles de plus de 350 m² (Montpellier). La surface en pelouse arrosée représente entre 11 et 15 % de la superficie de la parcelle selon les lotissements (Desprats *et al.*, 2011 ; Desprats *et al.*, 2012). Globalement la consommation en eau à l'extérieur représente entre 40 et 50 m³ par an (respectivement à Perpignan et Montpellier) pour les parcelles dont la taille est comprise entre 350 et 500 m². L'étude montre également qu'il existe une relation linéaire entre le volume d'eau utilisé à l'extérieur et la taille de la parcelle : la consommation annuelle augmentant de 100 litres pour chaque m² supplémentaire.



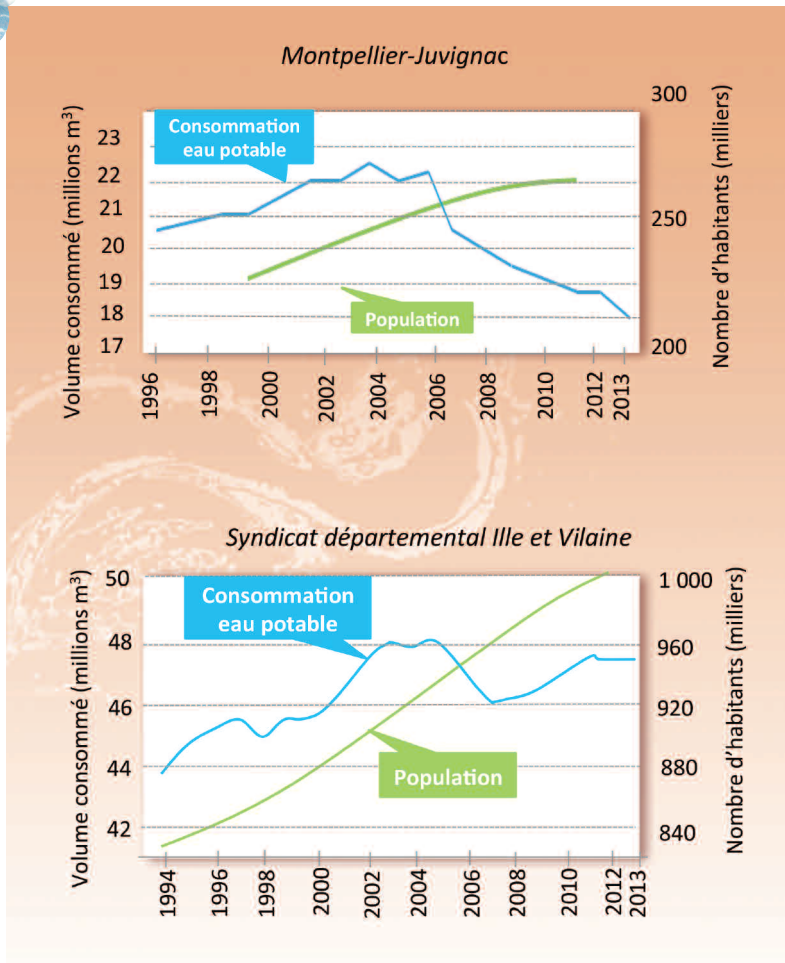
Consommation domestique moyenne annuelle. Données 2013, SISPEA. Source : Onema 2016.

1.3 Les tendances d'évolution de la demande en eau potable en France

Depuis plus de 10 ans, les données statistiques mettent en évidence un découplage croissant entre la croissance démographique et la demande en eau potable. La Figure 3 illustre ce découplage à travers deux exemples choisis dans des régions très contrastées d'un point de vue climatique (Bretagne et Occitanie). Cette tendance, qui a été mise en évidence au début des années 2000 à l'échelle de quelques grandes agglomérations françaises et européennes (Poquet, 2003 ; Poquet et Maresca, 2006) est confirmée par des données plus récentes (Barraqué *et al.*, 2011 ; Montginoul, 2013 ; Montginoul, Even *et al.*, 2013 ; Montginoul *et al.*, 2017) ainsi que par les données agrégées au niveau national produites dans le cadre de l'observatoire Soes puis Sispea. Bien que la qualité des données fournies par les gestionnaires pour alimenter ces observatoires demeure incertaine, le découplage entre la croissance démographique et la demande en eau potable est particulièrement bien marqué en ce qui concerne la consommation domestique (Figure 4).

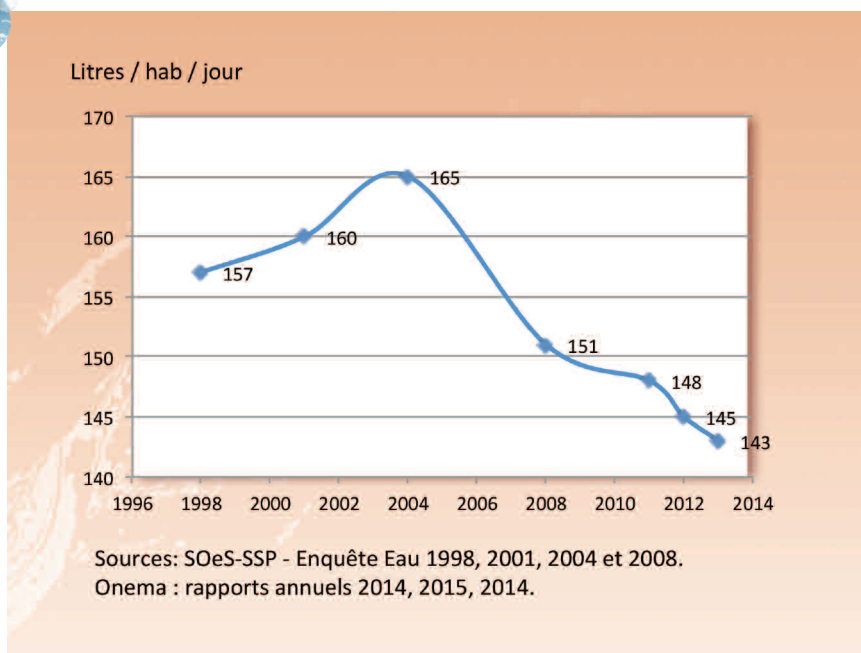
Des études ponctuelles réalisées dans quelques grandes villes ont montré que la baisse provenait en grande partie des activités économiques, commerciales et industrielles. À Perpignan, la baisse provient principalement des gros consommateurs : ainsi les 20 % d'utilisateurs qui ont les consommations les plus élevées (5^e quintile) ont vu leur consommation baisser de 7 % par an entre 2005 et 2011. La consommation des usagers des 3^e et 4^e quintiles accusent également une baisse significative de l'ordre de 5 à 6 % pendant la même période. En revanche, le volume des plus petits consommateurs (1^{er} quintile) augmentent de 6 % par an. Les chiffres globaux cachent donc une grande hétérogénéité de situations. Une évolution similaire est mise en évidence à Montpellier où la consommation des plus petits consommateurs (1^{er} quintile) augmente de 11 % entre 2007 et 2011 alors que celle des quatre autres quintiles diminue de 1 à 5 % (Montginoul *et al.*, 2017). Le constat de cette tendance à la baisse de la consommation interpelle nécessairement les prévisionnistes. Cette tendance est-elle conjoncturelle ou susceptible de se prolonger ? La consommation par habitant tend-elle vers une asymptote ? Si oui, quel sera le niveau de consommation incompressible et quand sera-t-il atteint ? Ces questions invitent à réfléchir aux facteurs déterminant le niveau de la consommation en eau potable et donc de son évolution.

Figure 3



Découplage entre démographie et demande en eau potable : exemples de Montpellier et de l'Ille-et-Vilaine. Sources : Montginoul et al. (2017) et Syndicat mixte de gestion pour l'approvisionnement en eau potable d'Ille-et-Vilaine.

Figure 4



Évolution de la consommation domestique moyenne en eau potable en France.

1.4 Les facteurs qui déterminent l'évolution de la demande à long terme

Ayant constaté le découplage entre la demande en eau et la croissance démographique, les économistes ont cherché à modéliser l'évolution de la consommation unitaire, en litres par habitant et par jour. Les études statistiques sur ce thème, dont la plupart se focalisent sur la demande domestique (Espey, Espey *et al.*, 1997; Arbués, Garcia-Valinas *et al.*, 2003; Dalhuisen, Florax *et al.*, 2003 ; Barraque, Isnard *et al.*, 2011; Montginoul 2013) ont mis en évidence les principaux facteurs que nous décrivons dans le Tableau 1.

Tableau 1 Facteurs déterminant la consommation en eau

Facteur	Influence sur la consommation domestique	Évolution future probable et impact sur la demande	
Revenu des ménages	En moyenne, une augmentation du revenu de 10 % génère une hausse de la consommation d'eau de 4 %. Cette réponse, mesurée statistiquement sur des centaines d'individu, est appelée « élasticité revenu de la demande »	Très dépendante de la situation locale	?
Taux d'équipement en appareils hydro-économiques	Électro-ménager (lave-linge et lave-vaisselle), chasses d'eau à double bouton, robinetterie et douches économes, etc.	Hausse du taux d'équipement efficaces => baisse de la consommation	-
Développement de nouveaux usages	Nouveaux équipements (jacuzzis dans les petites maisons voir immeubles, cabines de douche multi-jets)	Hausse de la consommation	+
Le climat	La consommation augmente avec la température (arrosage des jardins et remplissage des piscines, fréquence des douches) et baisse avec les précipitations	Réchauffement climatique => hausse de la consommation	+
Caractéristiques de l'habitat	Superficie habitable, taille de la parcelle, présence de jardin et de piscine sont autant de facteurs augmentant la consommation en eau. Les logements individuels consomment davantage que les appartements	Densification de l'urbanisme => baisse de la consommation	-
L'accès à une ressource de substitution	Certains ménages ont accès à une ressource alternative au réseau public, ils la substituent à l'eau potable pour certains usages ne nécessitant pas une eau de qualité (arrosage des jardins, chasses d'eau, voire douches et piscines). Il peut s'agir d'un forage, de l'accès à un réseau d'eau brute agricole ou de la récupération d'eau de pluie. Le développement de ces ressources pose un problème de prévision aux gestionnaires des services (voir Montginoul et Rinaudo, 2011)	Augmentation de l'accès aux ressources alternatives => baisse de la consommation d'eau potable	-
La culture de l'eau des ménages	La relation des populations à l'eau, en tant que bien de consommation, ressource naturelle et milieu environnemental est très variable d'une localité à l'autre. Elle reflète souvent des spécificités culturelles locales mais aussi la composition de la population (notamment dans le cas de villes à forte croissance où les migrations font disparaître la culture locale, par exemple en Méditerranée). Elle est influencée par les actions de la collectivité en matière de sensibilisation et par le développement de certaines technologies (smartphones)	Sensibilisation croissante à l'environnement en général et l'eau en particulier => baisse de la consommation	-
Comptage individuel	Les logements équipés d'un compteur individuel consomment moins que ceux ne disposant que d'un compteur collectif. Les compteurs intelligents aident à détecter les fuites	Généralisation des compteurs individuels y.c. intelligents => baisse de la consommation	-
La tarification des services d'eau	La consommation décroît lorsque le prix augmente. La réponse du consommateur à une augmentation de prix de 10 % est de l'ordre de 2 à 4 % de baisse de consommation. Cette réponse, appelée « élasticité prix » par l'économiste, est plus importante pour certains usages (par exemple arrosage des jardins) que pour d'autres (usages intérieurs). La structure de tarification influence aussi la consommation : par exemple une tarification par paliers croissants réduit plus la consommation des usagers qu'une tarification binôme, pour un prix moyen 120 m ³ équivalent	Augmentation du coût de l'eau donc du prix, généralisation des tarifications incitatives => baisse de la consommation	-

Certains de ces facteurs représentent des leviers que les collectivités locales peuvent actionner dans le cadre de leurs politiques publiques pour maîtriser la demande en eau. Les prévisions de la demande future devront donc réaliser des hypothèses concernant ces facteurs et les actions futures mises en place par les collectivités :

- sensibilisation des consommateurs à la nécessité d'utiliser l'eau avec modération, pouvant être accompagnée de distribution de kits hydro-économiques ;
- mise en place de tarifications incitatives, par palier croissant, ou saisonnière, visant à modifier le comportement des plus gros consommateurs notamment ceux utilisant beaucoup d'eau à l'extérieur ;
- généralisation des compteurs individuels et des compteurs intelligents à télérelève, qui permettent de sensibiliser les usagers à leur consommation et de les avertir en cas de fuite¹ ;
- densification de l'urbanisme et maîtrise des surfaces privatives et publiques consommatrices d'eau.

1.5 Qu'est-ce que la prévision à long terme?

Les gestionnaires ont besoin de prévoir la demande à laquelle ils auront à répondre à court, moyen et long terme. Chaque horizon temporel correspond à une problématique spécifique (Tableau 2). Ce document s'intéresse plus particulièrement à la prévision à long terme (de 15 à 30 ans). Ce type de prévision alimente les décisions relatives à la construction de grandes infrastructures dont les délais de réalisation dépassent la décennie (recherche d'eau souterraine, gros adducteur, transfert interbassin, usine de dessalement, barrage). Le risque associé à l'erreur de prévision est double. En cas de surestimation de la demande, les infrastructures construites seront surdimensionnées et le coût du capital associé pèsera durablement sur les usagers, entraînant une augmentation du prix de l'eau. En cas de sous-estimation, il existe un risque de défaillance du système : le réseau risque de ne pas satisfaire la demande en période de pointe ou, en année exceptionnellement sèche, générer des pertes d'activité économique et bloquer la réalisation de projets de développement urbain (projets suspendus du fait de la contrainte eau).

Tableau 2 Les différents horizons temporels de la prévision de la demande en eau potable

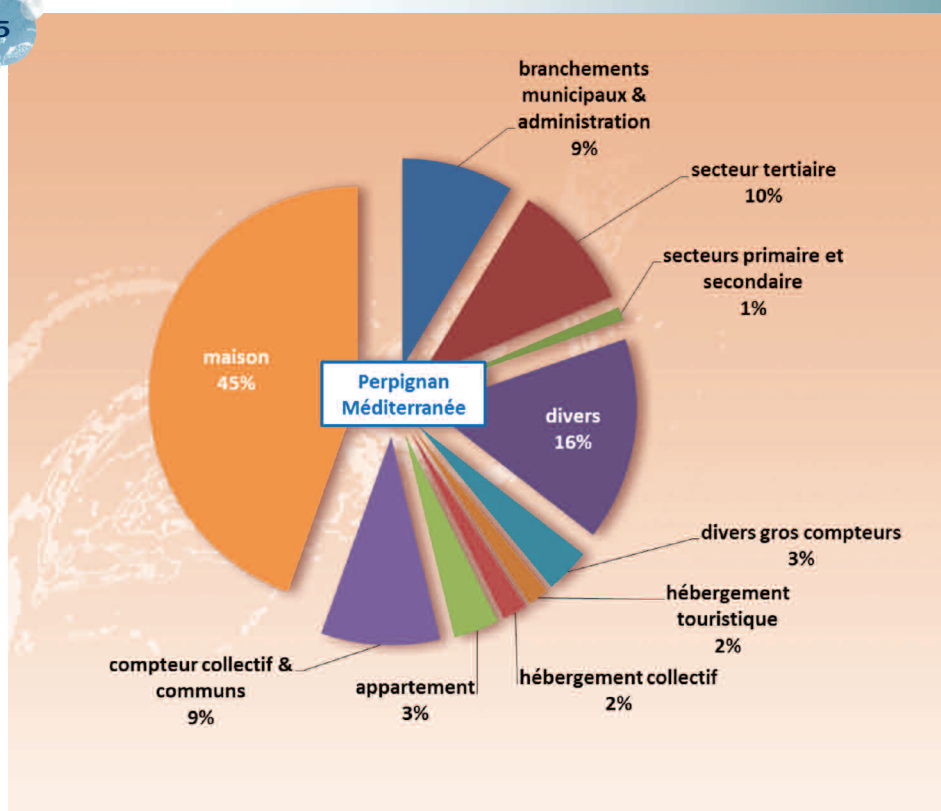
Horizon temporel	Finalité
Très court terme (quelques jours, semaines)	Anticiper les pics de demande pour optimiser le pilotage du réseau (stockage, pompage, démarrage de station), la consommation d'énergie ou pour planifier la maintenance
Court terme (1-2 ans)	Gestion tactique de l'utilisation d'un portefeuille de ressources pluriannuelles. Prévision des recettes et décision d'engager des dépenses de maintenance ou d'investissement (enjeu budgétaire) Ajustement de la tarification pour équilibrer le budget
Moyen terme (7-10 ans)	Phasage de la construction d'infrastructures Choix de politiques de tarification
Long terme (15-30 ans)	Dimensionnement des infrastructures principales (barrages, transfert, dessalement) de durée de vie importante

1 - À titre d'exemple, une étude australienne a montré que les ménages équipés d'un compteur associé à un affichage en temps réel de la consommation à l'intérieur de la maison réduisaient leur consommation de 6.8 % par rapport un échantillon témoin non équipé de cette technologie (Davies et al., 2014).

Analyse des composantes de la demande dans les métropoles de Perpignan et Montpellier

Dans une étude portant sur les métropoles de Perpignan et Montpellier, Irstea a développé un outil d'analyse des fichiers de facturation qui permet d'évaluer les différentes composantes de la demande, d'estimer des ratios de consommation spécifique pour chacun et de caractériser les tendances d'évolution sur les 5 à 10 dernières années (Montginoul et al., 2017). La méthode consiste tout d'abord à affecter chaque client à une catégorie d'usager, en s'appuyant sur une procédure de recherche lexicale automatisée dans le nom et l'adresse du client. La deuxième étape consiste à calculer une consommation annuelle pour une durée exacte de 365 jours, en tenant compte de la date réelle des relevés d'index. Enfin, des tendances d'évolution sont calculées pour chaque client en analysant l'évolution de sa consommation sur plusieurs années. Les résultats obtenus sont illustrés figure 5, ci-dessous.

Figure 5



Poids des différentes catégories d'abonnés dans le volume facturé par catégorie d'abonnés ($m^3/abonné/an$) à Perpignan (49 141 abonnés) et Montpellier (78 644). Source : Montginoul et al., 2017.



2 - Typologie des méthodes de prévision

Diverses méthodes ont été développées et mises en œuvre par les acteurs de l'eau pour prévoir l'évolution future de la demande en eau (Bauman *et al.*, 1998 ; Billing et Jones, 2008). Nous distinguons ici cinq principaux types d'approches méthodologiques utilisées dans le monde.

2.1 Modèles d'extrapolation temporelle

Cette méthode suppose que l'évolution future de la demande peut être déduite des tendances passées. La projection des tendances peut être appliquée globalement à l'échelle d'un service d'eau potable ou d'une région. Elle peut être affinée en raisonnant par classes de consommateurs (usagers domestiques, secteur tertiaire, industrie) ou par secteurs géographiques. La capacité prédictive de ce type de méthode est cependant très limitée car elles ne peuvent pas rendre compte de l'évolution du contexte socio-économique (tarification, technologie, emploi, démographie et urbanisme) et de l'occurrence de ruptures par rapport au passé.

2.2 Modèle basé sur des ratios de consommation spécifique

Cette méthode repose sur l'utilisation d'un ratio de consommation spécifique correspondant à la consommation moyenne annuelle d'un habitant ou d'un ménage. La demande est estimée en multipliant ce ratio par le nombre d'habitants (ou de ménages) que le service est susceptible de desservir dans le futur. Les applications diffèrent principalement en fonction du niveau de décomposition de la demande qui est retenu pour réaliser les calculs :

- estimation globale, on estime un unique ratio de consommation en divisant la consommation totale de la commune par le nombre d'habitants ; la projection réalisée suppose implicitement que la consommation liée aux activités économiques (commerce, industrie) et aux services publics (écoles, hôpitaux...) augmentera proportionnellement au nombre d'habitants ;
- estimation séparée de la demande domestique, de celle des usages publics (écoles, services publics...) et de la demande des usagers économiques (commerçants et industriels) ; chacune de ces composantes de la demande peut à son tour être décomposée en sous catégories. La demande domestique peut ainsi être estimée séparément pour l'habitat collectif et les maisons individuelles, pour les logements avec et sans compteurs, en utilisant des ratios de consommation différents pour chaque catégorie. De même la demande des usagers industriels et commerciaux peut faire l'objet d'une décomposition par branche d'activité (voir l'exemple californien ci-dessous). Les ratios de consommation peuvent être éventuellement considérés comme variables dans le temps, leur évolution future étant extrapolée à partir de l'observation des tendances passées.

2.3 Modèles statistiques multivariés

Cette méthode consiste à construire un modèle statistique établissant une relation numérique entre consommation unitaire d'une part (variable expliquée) et un ensemble de variables explicatives d'autre part. Les principales variables explicatives sont le prix de l'eau, le revenu des ménages, le niveau d'activité économique (emploi ou chiffre d'affaire), les caractéristiques de l'habitat (proportion d'habitat individuel ou collectif, densité urbaine), éventuellement les conditions météorologiques, etc. Le modèle est généralement établi en utilisant des données de panel, c'est-à-dire un échantillon de communes pour lesquelles on dispose de données sur cinq à dix ans. Le modèle peut ensuite être utilisé en prédiction pour calculer la demande à laquelle conduirait une évolution hypothétique des variables explicatives, en supposant que les coefficients du modèle, estimés sur une chronique passée, restent valables pour la période future considérée.

2.4 Modèle de simulation des composantes des usages (*end use models*)

Cette méthode consiste à simuler finement les différents usages que les consommateurs font de l'eau potable pour évaluer leur consommation totale. Principalement appliquée à la consommation domestique, la démarche estime séparément les volumes des usages liés à l'hygiène corporelle (douches, lavabos...), à l'utilisation des sanitaires, des équipements électroménagers (lave-linge et lave-vaisselle), aux autres usages intérieurs (cuisine) et aux usages extérieurs (arrosage des jardins, remplissage des piscines). Le principal intérêt de ces méthodes est de permettre de simuler l'effet à long terme de l'évolution de la technologie : performance de l'électroménager, réduction du volume des chasses d'eau, etc. Il s'agit donc de modèles plus prospectifs, permettant de simuler l'effet de politiques d'incitation aux économies d'eau. Cette capacité prospective reste cependant limitée par l'impossibilité d'intégrer l'effet de tous les facteurs déterminants, comme l'évolution du prix de l'eau, les changements de caractéristiques économiques de la population (gentrification ou popularisation de certains quartiers), etc. Cette méthode est utilisée depuis une dizaine d'années par les compagnies d'eau d'Angleterre et du pays de Galles.

2.5 Modèles liés aux prévisions d'urbanisme

Cette méthode consiste à appuyer la prévision de la demande en eau potable sur les documents d'urbanisme, le plus souvent à l'échelle du territoire d'une intercommunalité. Le modèle de prévision de la demande est alors intégré dans un Système d'information géographique. La demande en eau est estimée à l'échelle d'entités spatiales homogènes, en distinguant quelques grands types d'aménagements tels que des lotissements de maisons individuelles, des zones d'habitat collectif peu dense (R+2 / R+3), des zones d'habitat collectif dense, des zones d'activités économiques, etc. Chaque type d'aménagement est caractérisé par une consommation moyenne par hectare, le coefficient unitaire de consommation étant estimé sur la base d'observations. Cette méthode peut uniquement être utilisée lorsque la collectivité dispose d'un plan d'urbanisme détaillé qui se projette à moyen ou long terme. L'intérêt de cette approche est de pouvoir mettre en évidence les conséquences sur la demande en eau potable de différents scénarios d'aménagements urbains susceptibles de différer en termes de densification par exemple. Elle est particulièrement pertinente lorsqu'il existe une grande différence de consommation entre différentes formes d'habitat, par exemple du fait des consommations associées aux jardins (Encadré 2 page 18).

2.6 Modèles hybrides

Les méthodes décrites ci-dessus peuvent être combinées, notamment dans des outils logiciels spécifiques. Citons par exemple le logiciel IWR-MAIN. Développé et utilisé aux États-Unis, il repose sur un modèle statistique très élaboré qui décompose très finement la demande par secteur d'activité (industriel et commercial). Le logiciel intègre également une modélisation des usages finaux permettant de simuler l'effet de politiques volontaristes en matière d'économie d'eau. Le cas de la métropole de Los Angeles présenté plus loin illustre l'utilisation de ce type de méthodes hybrides.

2.7 Conclusion

Le choix de l'une des méthodes décrites ci-dessus dépend en grande partie du contexte et, en particulier, des principaux facteurs susceptibles d'expliquer l'évolution future de la demande (Tableau 3). Par ailleurs, la mise en œuvre de ces différentes méthodes suppose des niveaux d'investissement technique (données, logiciels, compétences) et financier très différents. Le choix d'une méthode est donc très dépendant de l'intensité des enjeux liés à la prévision. Le recours à des méthodes simples peut être approprié pour des services dont la population desservie et la consommation moyenne par habitant évolue relativement lentement, ou lorsque les prévisions n'ont pas vocation à supporter des choix d'investissement relativement importants et coûteux ou des durées d'amortissement de plusieurs décennies.

Tableau

3

Vue d'ensemble des principales méthodes de prévision de la demande en eau potable

Principal facteur déterminant l'évolution future de la demande en eau potable	Méthode adaptée	Résultat attendu
Tendance lourde, peu sensible aux variations de l'environnement économique, technique, climatique, donc susceptible de perdurer	Modèles d'extrapolation temporelle (projection des tendances passées)	Scenario tendanciel
Évolution du nombre d'usagers avec une consommation unitaire relativement stable, ou caractérisée par une tendance lourde	Utilisation des coefficients de consommation unitaires (litres/jour/habitants), éventuellement pondérés par une tendance (-x % / an)	Quantification de la demande associée à différents scénarios d'évolution démographique et économique
Évolution simultanée de plusieurs facteurs tels que les caractéristiques des ménages, l'activité économique, le prix de l'eau...	Modèles statistiques multivariés permettant de simuler l'évolution future du ratio de consommation unitaire en fonction d'hypothèses relatives aux facteurs de changement	Estimation intégrant les perspectives d'évolution des caractéristiques de la population (revenu, composition des ménages, etc.) et de l'activité économique Demande associée à différents scénarios de tarification
Évolution des pratiques de consommation et des équipements de ménages du fait du progrès technique ou de politiques volontaristes des collectivités	Modélisation par décomposition des usages finaux (liés à la cuisine, l'hygiène, les WC, etc.)	Estimation de la demande pour différents scénarios de politiques en faveur des économies d'eau
Évolution de l'urbanisme, du type de logement, du poids relatif des zones résidentielle et des zones d'activité économique	Modèles de prévisions basés sur l'occupation du sol, permettant d'estimer la demande à l'échelle d'entités spatiales homogènes	Prévision spatialement distribuée de la demande future, en lien avec les orientations des plans d'urbanisme (ex. Scot)

Relation entre consommation et caractéristiques de l'habitat

De nombreuses études ont montré que la consommation domestique est fortement corrélée aux caractéristiques de l'urbanisme et en particulier à la densité de l'habitat. La consommation par habitant est beaucoup plus élevée dans les zones dominées par les lotissements de maisons individuelles avec jardin. De même, la consommation extérieure tend à augmenter avec la taille des parcelles. Une étude conduite à Barcelone a montré que la consommation varie de 120 litres par habitant et par jour en habitat collectif dense à 200 litres dans les zones d'habitat à faible densité (Daumene et Sauri, 2006). Au Royaume-Uni, une étude conduite dans le Yorkshire estime la consommation à respectivement 370, 280, et 170 litres par habitant et par jour dans les maisons individuelles, les maisons jumelées en rangées et les appartements (Clarke *et al.*, 1997). En Californie, la consommation par habitant vivant en maison individuelle est le double de ceux résidant dans des petits immeubles collectifs (Hanak et Davis, 2006). Cette différence est particulièrement marquée dans les climats secs et chauds, où l'usage extérieur de l'eau pour les jardins et piscines peut représenter jusqu'à 50, voire 70 % de la consommation totale (Hanak & Davis 2006; Wentz & Gober 2007).

La précision des modèles de prévision de la demande en eau potable peut donc être améliorée en tenant compte de la nature des logements qui seront créés pour accueillir la population future (en cas de croissance). Ce facteur peut être pris en compte par différents types de modèles : les modèles basés sur des coefficients unitaires, les modèles statistiques multivariés ou les modèles décomposant les usages finaux (Jacobs & Haarhoff 2004). Le lecteur intéressé par cette problématique se rapportera à l'étude de Patterson & Wentz (2008) dans laquelle les auteurs estiment la demande associée à quatre scénarios d'urbanisme pour la ville de Phoenix aux États-Unis. Une approche plus complexe est présentée par Polebitski *et al.* (2011) qui couplent un modèle de simulation du développement urbain avec un modèle de demande en eau potable. Enfin, un exemple français est présenté par Desprats *et al.* (2015), avec une application à la ville de Montpellier.



3 - La prise en compte de l'incertitude

3.1 L'incertitude, une problématique émergente

Au cours des trois dernières décennies, les travaux de recherche appliquée développés en partenariat avec des gestionnaires des services d'eau potable ont donné naissance à de nombreux modèles innovants pour prévoir l'évolution de la demande à long terme. Quelle que soit l'approche technique adoptée (chapitre 2), ces modèles sont utilisés de manière assez déterministe pour construire des scénarios prédictifs. En effet, ils accordent généralement peu d'importance à l'incertitude associée aux facteurs déterminants la demande future, incertitude qui est au mieux traitée sous forme de tests de sensibilité ou par la construction de variantes autour d'un scénario tendanciel. Les résultats de ces modèles de prévision servent ensuite de base à un exercice de planification des investissements, réalisé en France dans le cadre des schémas directeurs d'alimentation en eau potable.

Or, les gestionnaires sont confrontés à une incertitude croissante concernant les facteurs qui déterminent l'évolution de la demande en eau future. Cette incertitude peut être d'origine naturelle (changement climatique), technique et technologique, réglementaire, économique ou politique. Le Tableau 4 décrit plusieurs facteurs d'incertitude et leurs conséquences sur la prévision de la demande en eau potable à long terme. En situation d'incertitude, la plupart des décideurs fondent leurs exercices de planification sur l'analyse d'un scénario tendanciel, éventuellement encadré par des variantes pessimistes ou optimistes, sans véritablement analyser l'incertitude, ni tenter de la quantifier en termes probabilistes. Il est pourtant essentiel d'en reconnaître l'existence dans le cadre de tout exercice de prévision de la demande en eau potable à long terme.

La reconnaissance de cette incertitude pose deux questions distinctes. La première est de savoir comment évaluer les conséquences sur la demande en eau future. Nous verrons dans les paragraphes qui suivent comment cette question peut être traitée via l'utilisation de scénarios ou avec des approches probabilistes reposant sur des simulations Monte Carlo². La seconde question est relative à l'utilisation des résultats de la prévision pour la prise de décision par le gestionnaire. Lorsque le gestionnaire adopte une approche probabiliste de la prévision, il se prépare à faire face à une large gamme de valeurs de la demande en eau future. Il abandonne alors une logique de planification fondée sur l'optimisation pour une logique fondée sur la capacité d'adaptation, lui permettant d'ajuster ses choix stratégiques au fur et à mesure que la demande évolue dans le temps. La reconnaissance des incertitudes et les approches probabilistes vont de pair avec un changement de paradigme en termes de décision.

2 - La méthode de simulation Monte Carlo consiste à isoler un certain nombre de variables déterminant la demande future en eau potable et à leur affecter une distribution de probabilité. Pour chacune, un grand nombre de tirages aléatoires est réalisé afin de calculer une fonction de densité de probabilité de la demande en eau.

Facteur d'incertitude	Nature de l'incertitude	Conséquences sur la prévision de la demande en eau potable
Évolution climatique	Durée et intensité des sécheresses et des vagues de chaleur estivales	Difficulté à prévoir la consommation liée aux douches, à l'arrosage des jardins, le développement des piscines. Difficulté à anticiper de nouveaux usages liés au refroidissement de la ville. Impact +++ sur la prévision de consommation en période de pointe, ++ sur la moyenne estivale, + sur la moyenne annuelle
Équipements des ménages	Évolution technique des équipements (ex. électroménager). Évolution des normes relatives à la robinetterie, chasses d'eau. Évolution des taux d'adoption par les ménages	Difficulté à prévoir la consommation par habitant. La tendance à la baisse observée depuis les années 2000 se poursuivra-t-elle ? A quel niveau se stabilisera-t-elle à moyen-long terme ?
Développement des ressources de substitution	Évolution des solutions techniques et de leur coût (récupération d'eau de pluie, forage individuel, recyclage des eaux usées). Évolution de la réglementation en la matière. Méconnaissance de l'usage fait des ressources alternatives et du taux de substitution	Difficulté à prévoir le nombre de ménages substituant une ressource alternative à l'eau du réseau
Prix de l'eau	Pérennité des subventions publiques (agences) accordées aux investissements AEP et assainissement. Coûts de production (exigences de traitement croissante). Évolution de l'assiette de facturation	Difficulté à anticiper la réduction de la consommation (élasticité) associée à une hausse de prix incertaine Quel développement des ressources de substitution ? Quel effort d'économie d'eau ? Les estimations actuelles de l'élasticité prix restent-elles valables dans le futur ?
Urbanisme	Densification plus ou moins poussée des formes d'urbanisme. Poids relatif de l'habitat collectif et individuel	Réduction de la consommation associée aux jardins
Activité économique	Évolution des process industriels pouvant entraîner une forte réduction de la consommation de gros clients Évolution de l'activité économique et de l'emploi pouvant conduire à la substitution d'activités fortement consommatrices d'eau par des activités tertiaires	Risque de perte d'un client majeur représentant un volume très significatif
Politique	Évolution des choix stratégiques de collectivités clientes qui achètent de gros volumes d'eau et qui pourraient opter pour des approvisionnements alternatifs	Risque de perte d'un client majeur représentant un volume très significatif

Quel impact du changement climatique sur la demande en eau potable ?

Le changement climatique est susceptible d'impacter la demande en eau potable associée aux usages intérieurs et extérieurs. La hausse des températures pourrait augmenter la fréquence des douches et l'utilisation de systèmes de refroidissement à eau (brumisateurs). À l'extérieur, l'usage de l'eau pour les jardins et les piscines augmentera en réponse à la hausse de l'évapotranspiration et à la baisse des précipitations. Des études mobilisant trois approches méthodologiques distinctes ont été conduites en France ou à l'étranger sur ce sujet.

La première approche consiste à établir des corrélations statistiques entre la consommation et les variables climatiques à partir de données observées dans le passé. Ces relations sont ensuite utilisées en simulation pour évaluer les conséquences probables de différents scénarios de changement climatique. En France, le SMEGREG (Syndicat mixte d'étude et de gestion de la ressource en eau du département de la Gironde) a par exemple montré que, pendant les étés chauds et secs, le volume mis en distribution dans le département de la Gironde augmente de 1,6 % par degré d'augmentation de la température maximale (Hébert *et al.*, 2009). Une étude conduite début 2000 au Royaume Uni estime que le changement climatique n'augmenterait la demande annuelle en eau potable que de 2 %, toutes choses égales par ailleurs (Goodchild, 2003). Une étude similaire à Seattle aux USA estime cet impact à 7 % pour 2030 et 15 % pour la fin du siècle (Polebitski *et al.*, 2011). À noter que ce faible pourcentage cache le fait que la hausse sera concentrée sur quelques mois en été et augmentera le pic de consommation de manière significative. L'une des limites de cette approche statistique est qu'elle suppose que les usagers se comporteront de la même manière aujourd'hui et dans le futur.

Une deuxième approche consiste à calculer les besoins d'irrigation des jardins pour le climat futur. Cette estimation peut être réalisée avec des modèles agronomiques, en se basant par exemple sur les besoins d'une pelouse. Cette méthode a été utilisée dans le sud de la France par Desprats *et al.* (2013). Utilisant des photographies aériennes à haute résolution, les auteurs quantifient d'abord les surfaces de jardin arrosées et celles des piscines pour 45 000 maisons. Ils estiment ensuite les besoins en eau associés pour le climat présent et futur. Les résultats suggèrent que la consommation des usagers résidant en maisons individuelles augmentera de l'ordre de 8-10 %, soit une hausse de 4 à 5 % de la demande totale pour des agglomérations comme celles de Montpellier et Perpignan.

Une troisième approche, déployée au Royaume Uni (Downing *et al.*, 2003), repose sur l'utilisation des modèles de simulation des micro-composantes (section 2.4). Les paramètres relatifs à la fréquence de certains usages ou à la consommation associée à chaque utilisation sont modifiés, en s'appuyant éventuellement sur des observations passées (voir exemple du SMEGREG, Hébert *et al.*, 2009). Cette étude anglaise suggère que l'impact sera faible, de l'ordre de 1,8 % en 2020 et entre 2,7 et 3,7 % en 2050.

L'un des problèmes communs à toutes les études citées ci-dessus est l'incertitude associée aux prévisions d'évolution du climat. Les prévisions issues des modèles climatiques globaux sont assez contrastées, parfois même contradictoires (en termes de sens de variation) sur certains territoires. Il en résulte une grande incertitude quant à l'impact sur la demande en eau. Cette incertitude est illustrée par une étude américaine déjà ancienne (Boland 1997) qui estimait l'impact sur la demande du changement climatique entre - 4 % et + 11 %. L'approche la plus commune pour résoudre cette difficulté consiste à travailler sur des ensembles de modèles (voir par exemple Goodchild 2003 ; Polebitski *et al.*, 2011 ; Desprats *et al.*, 2011).

Dans la pratique, le changement climatique est progressivement pris en compte dans les prévisions à long terme. C'est le cas au Royaume-Uni par exemple où certaines compagnies appliquent un coefficient d'augmentation annuel uniforme, basé sur l'étude nationale de Downing (2003) citée ci-dessus. Selon Charlton et Arnell (2011) qui ont passé en revue les plans de gestion de ressources de 21 compagnies, une augmentation de 2 à 5 % est généralement supposée pour l'horizon 2030. Ils soulignent que ce facteur d'évolution est secondaire par rapport à d'autres déterminants de la demande, mais aussi par rapport à l'impact du changement climatique sur les ressources disponibles.

Enfin le changement climatique n'aura pas que des effets directs sur la demande. Il impactera aussi l'intensité de certaines activités comme le tourisme, certaines activités industrielles et globalement l'ensemble de l'économie. Une étude appliquée à l'État d'Australie de l'Ouest (Thomas, 2008) a montré par exemple, à l'aide d'un modèle macro-économique (*Equilibre Général Calculable*), que cet impact dépasse de loin l'impact direct sur la demande en eau.

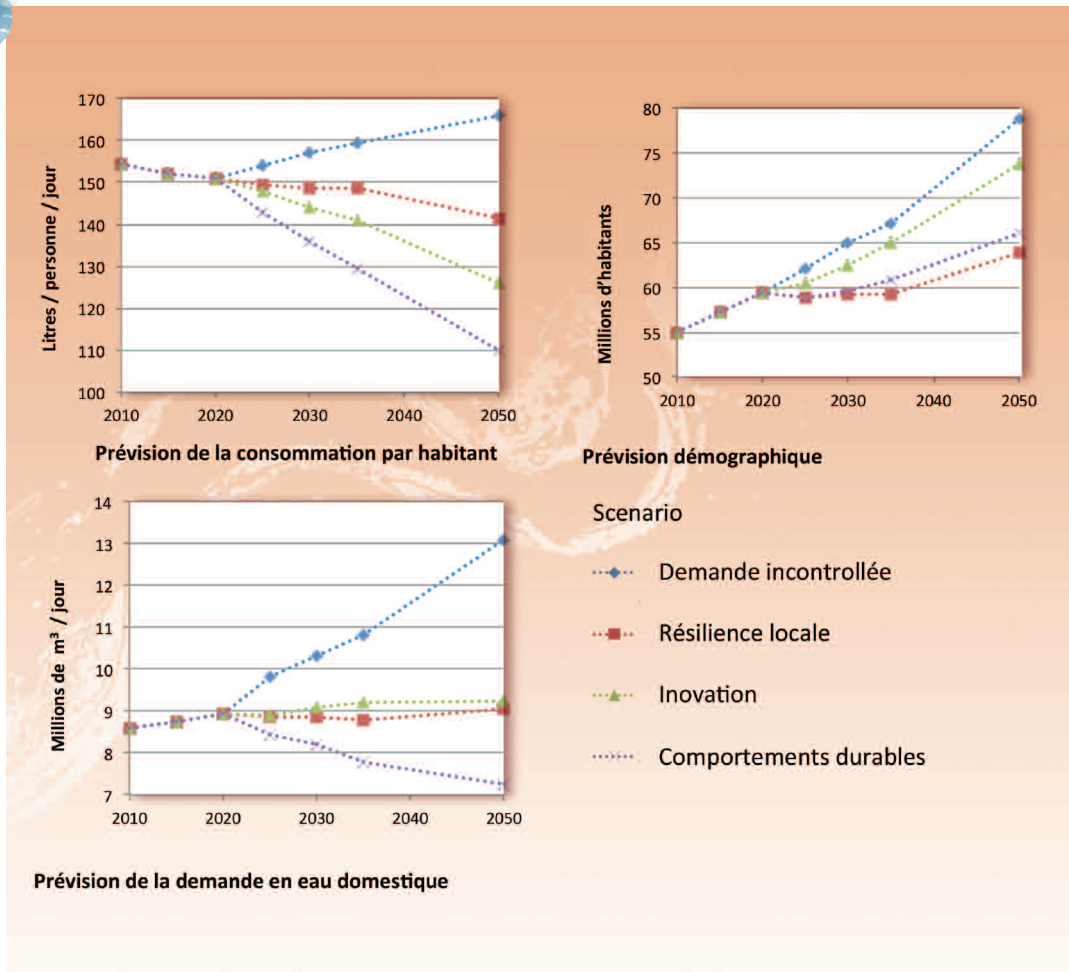
3.2 L'utilisation de scénarios

L'utilisation d'un nombre limité de scénarios contrastés est une première manière d'aborder l'incertitude associée aux prévisions de la demande en eau. On distingue ici la méthode des scénarios de l'analyse de sensibilité :

- l'approche des scénarios consiste à décrire de manière qualitative et narrative l'évolution probable de la société dans ses différentes composantes (domestique, industrielle, etc.) et celle des usages de l'eau associés. Les scénarios représentent ainsi différentes évolutions possibles du monde sous l'effet de changements globaux que le gestionnaire ne maîtrise pas. Ils servent ensuite de situations de référence pour évaluer la performance de stratégies de gestion et de développement du service d'eau face à une pluralité de futurs possibles ;
- l'analyse de sensibilité quant à elle consiste essentiellement à analyser comment évolue la demande calculée lorsque l'on fait varier les paramètres qui la déterminent dans une plage de valeurs. Une pratique courante consiste à utiliser l'analyse de sensibilité pour construire des variantes hautes et basses autour d'un scénario tendanciel.

Au Royaume-Uni, l'approche par scénarios a été mise en œuvre par l'Agence de l'environnement (*Westcott, 2004 ; Environment Agency 2009*). La démarche s'appuyait sur des scénarios développés dans le cadre d'une prospective environnementale antérieure qui visait à explorer l'évolution des pressions sur l'environnement à l'horizon 2030³. Ces scénarios ont ensuite été analysés par des experts du domaine de l'eau qui établissent des hypothèses quantitatives d'évolution de la demande cohérentes avec ces scénarios. Ces hypothèses ont ensuite été déclinées à l'échelle des grandes zones de gestion des services d'eau potable de l'Angleterre. La Figure 6 illustre les résultats obtenus, présentés sous forme d'une enveloppe encadrant les possibilités d'évolution de la demande à l'horizon 2050. Le résultat de cet exercice a été utilisé par les compagnies gestionnaires du service d'eau potable pour évaluer la robustesse de leur stratégie dans les contextes hypothétiques représentés par les scénarios.

3 - Ces scénarios décrivent quatre trajectoires possibles de l'économie, qui peuvent être positionnés selon deux axes principaux, l'un décrivant l'orientation sociétale dominante (société consumériste versus société tournée vers l'environnement), l'autre décrivant le mode de gouvernance dominant (tournée vers la croissance ou vers la durabilité).

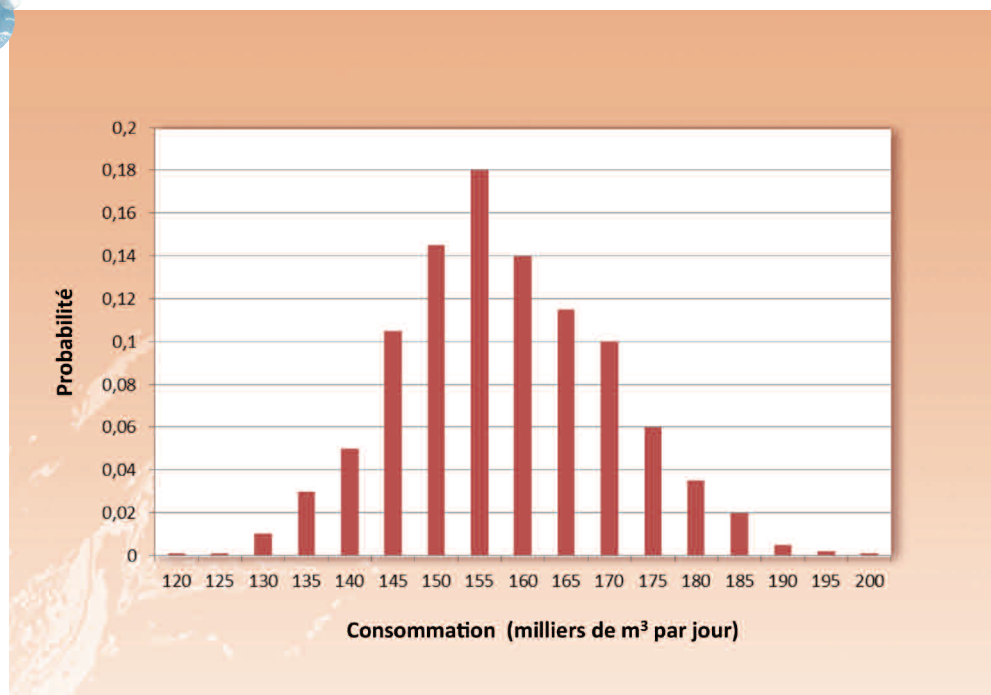


Évolution de la population, de la consommation par habitant et de la consommation résidentielle totale pour quatre scénarios. Source: Adapté de Environment Agency (2009): pp. 21–24.

3.3 L'approche probabiliste

Une critique fréquemment adressée à la méthode des scénarios décrite ci-dessus est d'utiliser un nombre trop réduit de scénarios pour véritablement représenter l'incertitude relative à l'évolution future des paramètres déterminant la demande. C'est pourquoi certains auteurs proposent de généraliser la démarche des scénarios en considérant plusieurs centaines, voire milliers de représentations des futurs possibles. Concrètement, cette approche dite probabiliste consiste à utiliser les modèles de prévision de manière répétée, en faisant varier les paramètres d'entrée de manière aléatoire ou selon des lois de distribution statistique prédéfinies (méthode Monte Carlo). Les principales sources d'incertitude considérées dans ces simulations Monte Carlo sont : l'évolution démographique, l'activité économique et l'emploi, l'évolution des ratios de consommation unitaire, le climat.

La Figure 7 (page suivante) présente un exemple fictif de résultat d'une approche probabiliste. Le graphe représente la distribution du résultat de plusieurs milliers de simulations de la demande en eau future d'une collectivité. Chaque barre donne la fréquence avec laquelle le modèle prévoit une valeur de demande future. Le résultat le plus probable (18 %) est une consommation de 155 000 m³ par jour. Le graphe montre également qu'il y a 68 % des chances que la consommation soit comprise entre 145 000 et 165 000 m³. La probabilité que la consommation dépasse 180 000 m³ est quant à elle de 6,3 %.



Exemple de prévision probabiliste de la demande en eau.

Cette approche commence à être utilisée de manière opérationnelle par les opérateurs du secteur de l'eau au Royaume-Uni par exemple, utilisant des logiciels comme @Risk (Palissade Corporation⁴). Le lecteur intéressé se reportera aux études réalisées à Tampa Bay aux USA (Hazen et Sawyer, 2004) et à Londres (Thames Water, 2010 ; voir également la partie B de cet ouvrage). La confrontation de ces scénarios de demande future aux stratégies de gestion alternatives considérées par le gestionnaire (en termes d'investissement par exemple) vise à faire émerger les stratégies les plus robustes, c'est-à-dire celles qui permettent de minimiser le risque de défaillance et pas nécessairement celles qui minimisent les coûts (Lempert *et al.*, 2003).