

ANALYSE MULTICRITERES ET CARACTERISATION DU MODELE DE GESTION INTEGRE DES RESSOURCES EN EAU DANS LA REGION D'ANNABA

Samir HANI^a, Nabil BOUGHERIRA^a, Fayçal TOUMI^a, Isam SHAHROUR^b

^a*Water Resources and Sustainable Development Laboratory. Badji Mokhtar-Annaba University, BP 12, 23000 Annaba, Algeria. hani.samir@outlook.fr*

^b*Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement (LGCgE), Université des Sciences et Technologies de Lille, 59655, Villeneuve d'Ascq, France*

Résumé.

La rareté des ressources en eaux conventionnelles, constitue un défi majeur pour le XXI^{ème} siècle et représente pour les pays à climat méditerranéen un souci majeur et une importante préoccupation qui affecte négativement le bien-être des citoyens et menacent l'avenir des générations futures.

L'Algérie est classée dans la catégorie « pays en pénurie d'eau ». En effet, le ratio ressources en eau par habitant et par an qui était de 1500 m³ en 1962 n'est plus que de 500 m³ aujourd'hui.

La gestion intégrée des ressources en eau dans la région d'Annaba, objet de cette recherche, vise à assurer le développement et la gestion coordonnés de l'eau, des territoires et des ressources qui s'y rapportent afin de maximiser le bien-être économique et social de manière équitable et sans toutefois compromettre la pérennité des écosystèmes vitaux.

Le modèle DPSIR (Forces motrices, Pressions, États, Impacts, Réponses) a été sélectionné pour répartir les variables en 5 catégories : socio-économiques ; pressions de pollution ; qualité de l'eau ; impacts écologique et sur la santé de l'homme et la réponse des gestionnaires.

Les variables les plus influentes ont été caractérisées et hiérarchisées à l'aide des réseaux de neurones artificiels et des techniques d'évaluation des risques. Les variables sélectionnées ont été classées à l'aide des techniques multivariées, de l'analyse factorielle, des composantes principales et de l'analyse de classification. Ainsi, il a été démontré qu'une combinaison de mesures pratiques est nécessaire pour assurer la gestion durable de l'eau.

Cette démarche peut être utilisée pour étudier d'autres systèmes hydrogéologiques du bassin méditerranéen où la ressource en eau subit une pression anthropique inquiétante.

Mots clés. Réseaux de neurones artificiels ; Modèle de gestion intégrée de l'eau; Socio-économiques; Annaba (Algérie).

Méthodologie :

Le véritable problème des régions semi-arides est l'absence de politique de gestion intégrée de l'eau. A ce jour, la science n'a pas mis en avant de cadre global abordant les problèmes de l'eau de façon intégrée. Des recherches complémentaires doivent être menées pour s'assurer du fait que la gestion des ressources en eau est basée sur une science concrète. Le temps est venu pour les scientifiques travaillant sur le thème de la gestion de l'eau rare de se tourner vers des approches multidisciplinaires (Plan Bleu, 2003 ; PNUE/PAM-Plan Bleu, 2009 ; Rivo, 1995). Un nouveau modèle conceptuel de gestion intégrée de l'eau est proposé pour la gestion de l'eau de la région d'Annaba. Les variables pertinentes de la gestion de l'eau sont caractérisées et les zones géographiques en situation de pénurie d'eau sont définies.

Le but est de savoir comment établir les relations de cause à effet à utiliser comme outils d'aide à la décision. Le modèle adopté intègre à la fois des données socio-économiques (population, revenu, occupation du sol, tourisme taux de raccordement, fuites, ...), des données relatives aux pressions de pollution (déchets solides, génération des eaux usées

domestiques, pesticides, fertilisants Chimiques, stations Service,), à la qualité de l'eau (Nitrates, Chlorures, nitrites, ...) , à la santé publique, aux impacts écologiques (mortalité, perte de productivité, ...) et aux réponses des décideurs (dessalement de l'eau de mer, stockage des eaux pluviales, traitement de l'eau, ...). Il implique le passage d'une approche par l'offre à une approche par la demande pour la gestion des ressources en eau. Les approches intégrées, préventives et éco systémiques ont été introduites. Nous appliquons le développement de la méthodologie de recherche et la validation du modèle adopté à la gestion durable des ressources en eau. Nous analysons les méthodes de l'opinion des experts pour le développement et la validation du modèle et des variables et nous les comparons avec des modèles de gestion bien établis.

La région d'Annaba est confrontée à une grave pénurie d'approvisionnement en eau de bonne qualité. Le système aquifère, qui représente la principale ressource dans la région, est limité à l'ouest par le massif métamorphique de l'Edough, dans le sud par le lac Fetzara et l'extension vers l'est par les monts de Cheffia, dans le nord par la mer Méditerranée, et enfin à l'est par les massifs numidiens de Bouteldja, Fig. 1. La superficie totale de la région d'Annaba est de 760 km². Dans cette recherche, la zone d'étude a été divisée en 21 agglomérations.

Les prélèvements d'eau actuels sont très loin de satisfaire la demande en termes de quantité et de qualité : l'approvisionnement en eau domestique est à seulement 100 litres/habitant/jour, comparativement aux 150 L/h/j recommandé par l'OMS (World Health Organization, 2004). La surexploitation de l'aquifère a conduit à la baisse du niveau des eaux souterraines et à la détérioration de la qualité de l'eau en raison de l'intrusion saline. Les teneurs en Chlorures et en Nitrates sont très élevées. Au cours de ces dernières années, la pénurie des ressources en eau et la pollution de l'eau ont sévèrement entravé le développement socio-économique.

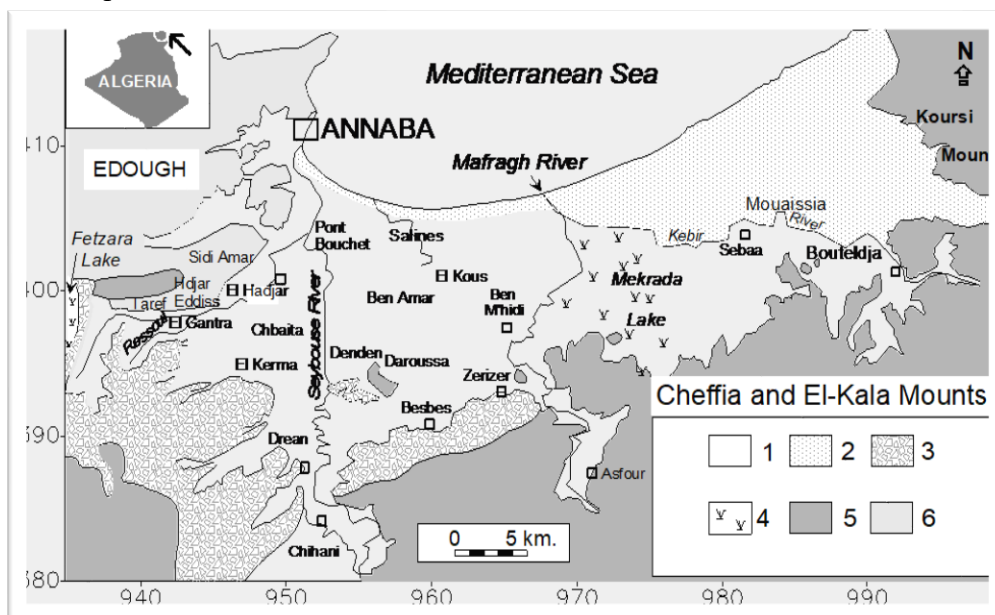


Fig. 1. Esquisse géologique de la plaine de la région d'Annaba: (1) alluvions récentes et actuelles; (2) dunes; (3) alluvions, (4) marécage, (5) grès et argile, (6) formations métamorphiques

Méthodologie :

Les variables pertinentes ont été caractérisées en utilisant les réseaux de neurones artificiels (RNA), l'évaluation du risque sur la santé humaine et de l'opinion des experts. Les variables choisies seront classées en utilisant l'analyse statistique multivariée, l'analyse factorielle et l'analyse en composantes principales ainsi que la classification hiérarchique. Sur la base des résultats de cette recherche de nouvelles recommandations seront élaborées pour

assurer la gestion durable de l'eau et maximiser le bien-être économique et social de manière équitable et sans toutefois compromettre la pérennité des écosystèmes vitaux.

Dans cette recherche, un modèle de gestion intégrée de l'eau basé sur la relation de cause à effet abordant le cycle entier de l'eau est utilisé. Des variables hydrologiques ont été développées et classées en cinq catégories qui sont d'ordre socio-économique, des contraintes de pollution, de qualité de l'eau, de l'opinion des experts d'impact de l'activité humaine l'évaluation du risque sur la santé humaine (PNU/PAM-Plan Bleu 2009).

Les variables pertinentes ont été caractérisées en utilisant les RNA, Les variables choisies seront classées en utilisant l'analyse statistique multivariée, l'analyse factorielle et l'analyse en composantes principales ainsi que la classification hiérarchique. Sur la base des résultats de cette recherche de nouvelles recommandations seront élaborées pour assurer la gestion durable de l'eau.

RÉSULTATS

Application des réseaux neuronaux artificiels

Les variables représentant les facteurs socio-économiques: population (POP), revenu par habitant (ICP), occupation des sols (LDU), tourisme (TRS), accès à l'eau potable (WSP), le système des eaux usées(WWC), la couverture des eaux pluviales (SWCC), la consommation d'eau par habitant (WCC), le prix de l'eau (WPC), l'efficacité dans la collecte des recettes (ERC), la consommation d'eau pour l'agriculture (AWC), l'emploi des femmes (GEE), la sensibilisation et l'éducation à l'eau (WAE) et l'eau qui les pertes (UFW), étaient considérés comme des variables d'entrée possible, tandis que la variable de sortie est représentée par le captage de l'eau (WAbstract), figure 2.

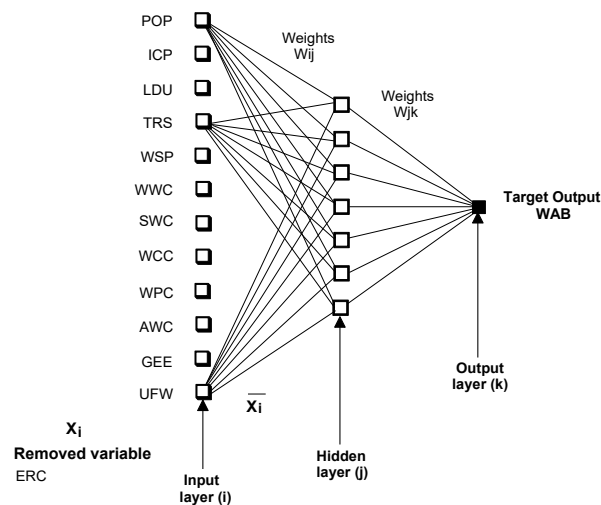


Fig. 2. Un MLP à trois couches pour les variables socio-économiques

Le meilleur modèle optimal trouvé est un perceptron multicouche MLP (3 couches) avec 7 nœuds cachés et une erreur minimale de 0,089 par rapport aux autres types de réseaux neuronaux. Le modèle présente de très bonnes performances en termes de vérification, avec un ratio SD de 0,045. Les erreurs quadratiques moyennes (RMSE) pour l'apprentissage, la vérification et la validation sont faibles. En outre, le coefficient de corrélation est supérieur à 99% pour l'apprentissage, la vérification et de test, ce qui montre un excellent accord entre les prélèvements d'eau observés et calculés.

L'analyse de la sensibilité dans la phase de vérification indique que le revenu par habitant est le facteur socio économique le plus pertinent, suivi par le tourisme. Les facteurs les plus influents sont dans l'ordre : la consommation d'eau pour l'agriculture, la consommation d'eau par habitant, la population, l'occupation des postes par les femmes,

l'approvisionnement en eau, la couverture des eaux usées, le prix de l'eau, la couverture des eaux pluviales, eau non comptabilisée et l'occupation des sols. Le modèle RNA rejette la variable efficacité du recouvrement des recettes. Les résultats des RNA et des avis des experts sont identiques pour la variable approvisionnement en eau et ils diffèrent dans le classement des variables restantes.

Application de la matrice de corrélation

La matrice de corrélation montre que log népérien de l'abstraction de l'eau présente une relation linéaire significative positive avec le ln (couverture des eaux pluviales), le revenu par habitant, ln (consommation d'eau pour l'agriculture), ln (population), ln (eau non comptabilisées) et ln (tourisme). La corrélation positive est plus grande entre les captages et les eaux pluviales, et la plus basse avec le tourisme. L'augmentation du revenu par habitant, l'intensification de la consommation d'eau pour l'agriculture, la croissance de la population et la hausse du nombre de touristes sont des facteurs importants qui influencent la demande en eau.

Les prélèvements d'eau augmentent avec les quantités d'eau non comptabilisé. Le ln (captage d'eau) a également une relation linéaire négative avec la sécurité d'accès à l'approvisionnement en eau. Si les prélèvements d'eau augmentent alors que la salinité augmente ceci réduit les possibilités pour les utilisateurs d'accéder à une eau de qualité. Il existe une relation linéaire positive entre ln (population) et ln (tourisme), ln (couverture des eaux pluviales), le revenu par habitant, ln (eau non comptabilisées) et ln (occupation des sols). Le revenu par habitant présente des relations linéaires positives avec ln (couverture des eaux pluviales), ln (tourisme), ln (consommation d'eau pour l'agriculture) et ln (eau non comptabilisée). Le ln (utilisation des terres) présente des relations linéaires positives significatives avec le ln (couverture des eaux usées) et le ln (tourisme), et une relation linéaire négative avec ln (consommation d'eau pour l'agriculture). Le ln (tourisme) présente des relations linéaires positives avec ln (couverture des eaux pluviales), ln (eau non comptabilisées) et ln (couverture eaux usées).

L'accès à l'eau potable présente une relation linéaire négative avec ln (eau non comptabilisée). Le ln (système de couverture en eaux pluviales) présente une relation linéaire positive avec ln (consommation d'eau pour l'agriculture) et le ln (eau non comptabilisée). La consommation d'eau par habitant présente une corrélation négative avec le prix de l'eau. Le ln (consommation d'eau pour l'agriculture) présente une relation linéaire positive avec le ln (eau non comptabilisée).

Application des analyses multivariées

Analyse du Cluster : elle a été choisie pour classer les observations et les variables dans la même catégorie de l'ensemble de données, en groupes plus significatifs afin que chaque groupe soit plus ou moins homogènes et distinct des autres clusters.

La figure 3a montre deux groupes distincts de variables. Le premier comprend le revenu par habitant, la couverture en eau pluviale, le captage d'eau, la population, le tourisme, l'eau non comptabilisée, la consommation d'eau pour l'agriculture et la consommation d'eau par habitant. Il peut être étiqueté comme *le captage d'eau*. Le deuxième groupe est l'occupation des sols, la couverture des eaux usées, l'emploi des femmes, l'accès à l'eau potable et le prix de l'eau. Il peut être labélisé *occupation des sols*.

Le premier groupe de communes (à droite) est caractérisé par *l'occupation des sols* et le deuxième groupe est étiqueté par *le captage des eaux souterraines* figure 3b.

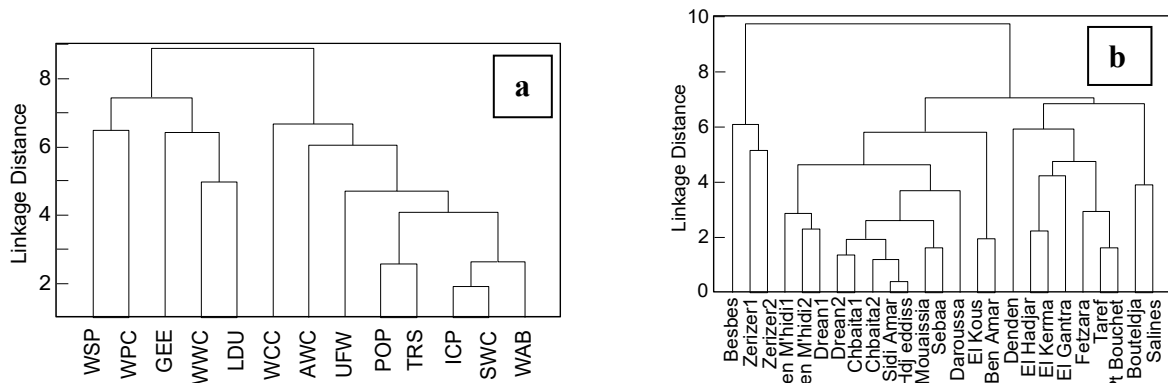


Fig. 3 (a) les résultats des analyses de cluster pour les variables socio-économiques, et (b) cluster des communes en fonction des facteurs socio-économiques

Analyse en Composantes Principales (ACP)

Le but est de réduire le nombre de variables en un nombre restreint et de classer les variables et les communes présentant des caractéristiques similaires en fonction de ces facteurs. En outre, les variables supprimées des RNA ont été pris comme des variables supplémentaires.

L'ACP a été effectué pour les catégories socio-économiques, pression de la pollution, état de qualité de l'eau, impact et réponses des gestionnaires.

L'analyse des facteurs de corrélation entre variables montre que le premier facteur correspond à la plus grande valeur propre (5,49) et représente environ 42,24% de la variance totale. Il est très fortement corrélé avec le captage d'eau, la récupération des eaux pluviales, la population, le revenu par habitant, le tourisme et les fuites d'eau (avec une corrélation négative). Le deuxième facteur, représente 16,2% de la variance totale. Il est fortement corrélé à la couverture des eaux usées, l'occupation des sols (corrélation négative) et le prix de l'eau (corrélation positive). Le troisième facteur, correspondant à la valeur propre de 1,65 et représente 13%. Il est corrélé significativement avec les prix de l'eau (corrélation négative) et la consommation d'eau par habitant (corrélation positive). Le Prix de l'eau présente une forte opposition avec la consommation en eau par habitant. Si le prix de l'eau augmente alors la consommation d'eau par habitant diminue et vice versa.

Sur la base des ordres de grandeur du facteur de coordonnées pour les variables dans l'analyse, le 1^{er} facteur représente le captage d'eau (Fig. 4a). Le facteur 2 peut être caractéristique de l'occupation des sols et le facteur 3 peut être représentatif de la relation consommation d'eau / prix de l'eau.

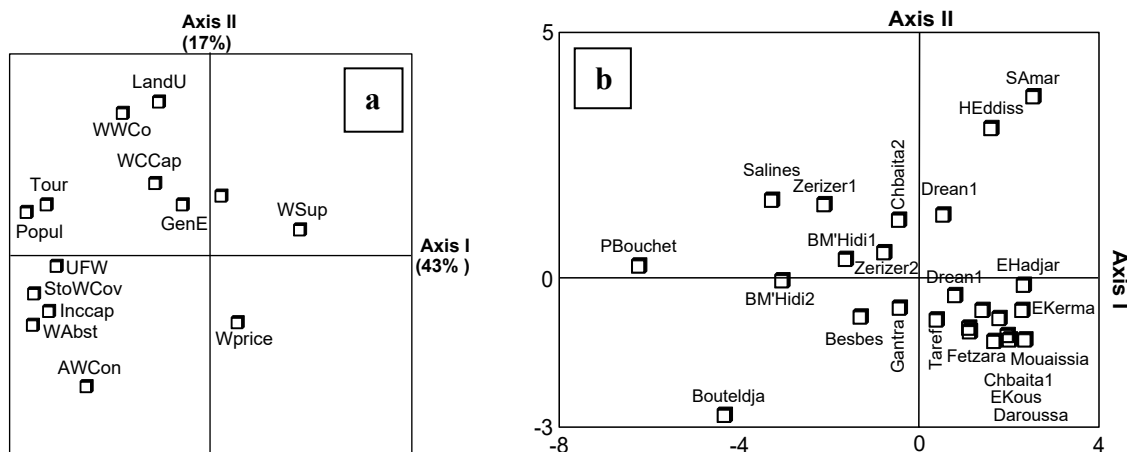


Fig. 4. (a) Projection des variables dans le plan I-II et (b) la projection des communes dans le plan I-II

De même la figure 4b montre que les secteurs de Besbes et Bouteldja sont analogues en termes de prélèvement d'eau, la couverture des eaux pluviales et la consommation en eau pour l'agriculture. Zerizer2, Chbaita2 et Ben M'hidi1 sont similaires en termes de population, occupation des sols, le tourisme, la couverture des eaux usées et l'emploi des femmes. Drean2, El Kous, Ben Amar, Taref, Chbaita1, El Kerma et Denden se distinguent par la variable prix de l'eau. El Gantra se distingue par le revenu par habitant et par les quantités d'eau non comptabilisées. Drean1 se distingue par un accès sécuritaire à l'approvisionnement en eau et l'efficacité de la collecte des recettes comme une variable supplémentaire. Pont Bouchet, Zerizer1 et Salines sont comparables en termes de consommation en eau par habitant.

Les résultats de l'ACP et de l'analyse des clusters présentent des similitudes et des différences entre les cinq catégories de variables. Les caractéristiques des groupes de variables identifiés dans l'analyse du Cluster sont similaires à celles de l'ACP. Toutefois, l'ACP donne plus de détails sur les groupes de variables (facteurs), l'association des individus (secteurs) et les variables correspondantes. Elle donne le poids de chaque groupe de variables reflété par la valeur de la variance.

Par conséquent, les résultats de l'ACP peuvent être appliqués à la formulation de la stratégie des programmes prioritaires pour gérer le problème de l'eau dans des zones géographiques identifiées. Par ailleurs, l'analyse du cluster peut être utilisée comme un outil à l'amont pour enquêter sur la hiérarchie et les formes des groupes possibles de communes et les variables correspondantes.

L'Analyse des facteurs a été utilisée à des fins de comparaison avec les résultats de l'ACP. Cette analyse permet de réduire le nombre de variables observées par catégorie à un petit nombre de facteurs latents non observés qui ne sont pas corrélés avec les autres, et classe les variables au sein de ces facteurs.

Le nombre de facteurs importants résultant de l'ACP pour les cinq catégories de variables, ont été utilisés pour l'analyse factorielle. Cette dernière a été réalisée pour les catégories socio-économiques, pression de pollution, état de qualité de l'eau, impact et réponses des gestionnaires.

Les saturations des variables socio-économiques montrent que le 1^{er} facteur représente 38,9% de la variance totale. Il contient des variables corrélées, qui sont le captage, la couverture des eaux pluviales, le revenu par habitant, la consommation en eau pour l'agriculture, la population et l'eau non comptabilisée. Ce facteur représente le captage des eaux dans l'aquifère côtier.

Le 2^{ème} facteur représente 18,5% de la variance totale et est identifié par l'occupation des sols et la couverture des eaux usées. Ce facteur peut être étiqueté « occupation des sols » qu'on peut considérer comme un paramètre important pour améliorer les services d'assainissement.

Le 3^{ème} facteur, 13,7% de la variance totale, regroupe la consommation d'eau par habitant et les prix de l'eau. Le troisième facteur montre que le prix de l'eau est un paramètre déterminant dans la consommation de l'eau par habitant.

L'analyse factorielle révèle un nouvel indicateur important dans le captage des eaux, il s'agit de la consommation en eau pour l'agriculture. Par contre, elle réduit le rôle de la variable tourisme.

DISCUSSION ET CONCLUSIONS

Dans cette recherche, un nouveau modèle conceptuel a été élaboré en fonction de relations de cause à effet, figure 5. Il met en évidence les éléments les plus importants et les techniques pour les caractériser, et indique que le développement de la gestion des ressources

en eau doit tenir compte des aspects écologiques et de la protection des ressources disponibles.

Les variables pertinentes ont été caractérisées et hiérarchisées en utilisant les RNA, les techniques d'évaluation des risques et l'opinion des experts. Les variables retenues ont été classées, à l'aide des techniques d'analyse multivariée du cluster, analyse en composantes principales et l'analyse factorielle.

Les conclusions de l'analyse des données en utilisant les RNA, les statistiques élémentaires, l'analyse multivariée, l'évaluation des risques sur la santé et de l'opinion des experts peuvent être résumée comme suit :

- La gestion durable de l'aquifère côtier doit accorder la priorité absolue à la réutilisation des eaux usées traitées pour l'agriculture suivie par le dessalement de l'eau.
- La concentration en cadmium doit être réduite de 20%.

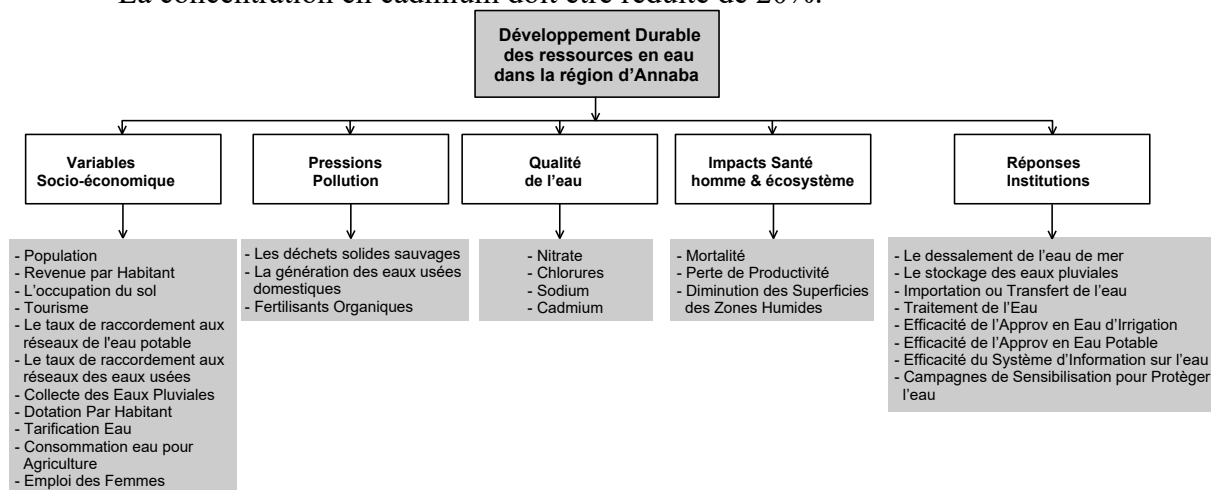


Fig. 5. Modèle conceptuel de gestion intégrée de la région d'Annaba

- un groupe de municipalités (Bouteldja et Pont Bouchet) se caractérisent par des prélèvements d'eau élevés et par un besoin en ressources en eau supplémentaires, notamment par le dessalement et le transfert régional de l'eau. Il se distingue aussi par la pollution anthropique significative générée par les activités socio-économiques.

- un second groupe (Sidi Amar, eddiss Hdj, Ben M'hidi2, Bouteldja et Pont Bouchet) qui s'individualise par une importante morbidité, induites par les maladies liées à l'eau.

- Les secteurs de Besbes, Zerizer2, Pont Bouchet, Ben M'hidi1 et Mouaïssia sont caractérisés par l'existence d'écosystèmes liés aux oueds présents dans le secteur.

- Les communes de Ben M'hidi2, Pont Bouchet et Zerizer1 ont des concentrations élevées en NO₃, en raison de la surcharge des installations de traitement à l'intérieur de leurs frontières et l'élimination des effluents dans un environnement vulnérable.

- Les communes situées à proximité du littoral sont caractérisés par une importante concentration en Chlorures due à l'intrusion d'eau de mer.

- Le plan d'eau devrait être reformulé pour tenir compte des priorités des zones géographiques en fonction de contraintes spécifique de chacune.

- L'objectif visant à concilier développement économique, aménagement du territoire et gestion durable des ressources, nécessite bien entendu une approche pluridisciplinaire. Il impose également de développer de nouveaux outils d'aide à la concertation entre les différents acteurs pour éviter les conflits.

- Il a été démontré que seule une combinaison de mesures pratiques est capable d'assurer la gestion durable de l'eau.

- Ce modèle de gestion permet de satisfaire les besoins des populations en eau potable de qualité, afin d'améliorer l'hygiène et la santé et de prévenir les grandes épidémies.

Références.

- Plan Bleu, (2003) : Commission Méditerranéenne du Développement Durable, résultats du Forum de Fiuggi sur les "Avancées de la gestion de la demande en eau en Méditerranée" Constats et Propositions
- PNUE/PAM-Plan Bleu, (2009) : Etat de l'environnement et du développement en Méditerranée. PNUE/PAM-Plan Bleu, Athènes.
- Rivm, (1995): A General Strategy for Integrated Environmental Assessment at the European Environment
- World Health Organization (2004) *Guidelines for Drinking-Water Quality*, third edn. Vol. 1, Recommendations. WHO, Geneva, Switzerland.