PRESENTATION DU GUIDE DU MAROC RELATIF A LA DELIMITATION DES PERIMETRES DE PROTECTION DES CAPTAGES D'EAU SOUTERRAINE DESTINES A L'EAU POTABLE

Mohamed Sinan, Ecole Hassania des Travaux Publics, Casablanca, Maroc

ABSTRACT

The Kingdom of Morocco endowed itself of a new law on water, known as the law 10/95, regulating the utilization, the exploitation, the management and the protection of its water resources. These last are submitted to several important constraints, notably a structural rarity, a temporal irregularity, a bad spatial distribution and a vulnerability to the drought and the pollution. The middle volume of water resources of Morocco rises to about 29 billions of m3/an. The mobilizable water volume, in year middle hydrologique, is appraised to about 20 billions of m3 / year, distributed in 16 billions of m3/an of superficial water and 4 billions of m3 /year of ground water. Currently close to 70% of these resources are mobilized already (11 billions of m3 superficial water/year by dams and 2.7 billions m3/an of groundwater by wells, sources, etc). capital water per person and per year adjoins 1000 m3/person/year currently, considered commonly as the critical doorstep, indicating the hydraulic stress apparition. This capital water risks to lower further in years to come, by reason of a part, of the strong person demographic thrust that knows the country (notably in farming middle) and of the negative impact of the successive years of drought that hits the country on the other hand since more of about twenty years.

The protection of water resources of the country against the pollution constitutes one of means the more sure and most economic to assure them a lasting protection and to satisfy needs in future generation water. This protection should make himself through the development of vulnerability maps to the pollution (permitting to orient the polluting activity implantation: industrial zones, discharges, dismissal of worn-out water either domesticates industrial, etc) and by the protection of drinking water catchments (dams, swells, sources, etc) by the cutoff and the stake in protective perimeter œuvre. The law on water 10/95 imposes the stake indeed in protective perimeter œuvre around catchments of drinking water. However, to this no day of intended underground water works to the human feeding is protected really by the protective perimeters either brought closer distant. Alone of the immediate protective perimeters (fences and local techniques sheltering the catchment him even and the material annexes pumping) surround catchments of drinking water, notably most important, systematically.

In order to come with the stake in œuvre of the law 10/95, the General Direction of the hydraulics of Morocco decided the development of a methodological guide of protective perimeter cutoff, permitting to standardize national at the level the gait to follow and data to use for the dimensionnement of these protective zones around catchments of drinking water in porous middle. The present communication has for object to present a summary of the new elaborate guide for the account of the FAO (that assured financing) and of the General Direction of the hydraulics of Morocco.

RÉSUMÉ

Le Royaume du Maroc s'est doté d'une nouvelle loi sur l'eau, connue sous le nom de la loi 10/95, réglementant l'utilisation, l'exploitation, la gestion et la protection de ses ressources en eau. Ces dernières sont soumises à plusieurs contraintes importantes, notamment une rareté structurelle, une irrégularité temporelle, une mauvaise répartition spatiale et une vulnérabilité à la sécheresse et à la pollution. Le volume moyen des ressources en eau du Maroc s'élève à environ 29 milliards de m^3/an. Le volume d'eau mobilisable, en année hydrologique moyenne, est estimé à environ 20 milliards de m^3/an, réparti en 16 milliards de m^3/an d'eau superficielle et 4 milliards de m^3 /an d'eau souterraine. Actuellement près de 70 % de ces ressources sont déjà mobilisées (11 milliards de m^3 /an d'eaux superficielles par des barrages et 2.7 milliards m^3/an d'eaux souterraines par des puits, forages, sources, etc). Le capital eau par habitant et par an avoisine actuellement 1000 m^3/hab/an, communément considéré comme le seuil critique, indiquant l'apparition de stress hydraulique. Ce capital eau risque de baisser davantage dans les années à venir, en raison d'une part, de la forte poussée démographique que connaît le pays (notamment en milieu rural) et de l'impact négatif des années successives de sécheresse qui frappe le pays depuis plus d'une vingtaine d'années d'autre part.

La protection des ressources en eau du pays contre la pollution constitue un des moyens les plus sûrs et les plus économiques pour leur assurer une protection durable et pour satisfaire les besoins en eau des futures générations. Cette protection devra se faire à travers l'élaboration des cartes de vulnérabilité à la pollution (permettant d'orienter l'implantation des activités polluantes : zones industrielles, décharges, rejet d'eau usée domestique ou industrielle, etc) et par la protection des captages d'eau potable (barrages, forages, puits, sources, etc) par la délimitation et la mise en œuvre des périmètres de protection. La loi sur l'eau 10/95 impose en effet la mise en œuvre des périmètres de protection autour des captages d'eau potable. Cependant, à ce jour aucun des ouvrages d'eau souterraine destinés à l'alimentation humaine n'est réellement protégé par des périmètres de protection rapprochée ou éloignée. Seuls des périmètres de protection immédiate (clôtures et locaux techniques abritant le captage lui même et le matériel annexe de pompage) entourent systématiquement les captages d'eau potable, notamment les plus importants.

Afin d'accompagner la mise en œuvre de la loi 10/95, la Direction Générale de l'Hydraulique du Maroc a décidé l'élaboration d'un guide méthodologique de délimitation des périmètres de protection, permettant de standardiser au niveau national la démarche à suivre et les données à utiliser pour le dimensionnement de ces zones de protection autour des captages d'eau potable en milieu poreux. La présente communication a pour objet de présenter un résumé du nouveau guide élaboré pour le compte de la FAO (qui a assuré le financement) et de la Direction Générale de l'Hydraulique du Maroc.

1. INTRODUCTION

La lutte contre la pollution des ressources en eau souterraines constitue un des moyens les plus faciles et les moins coûteux pour atténuer les conséquences de cette rareté.

Cette protection devra se faire à travers l'élaboration des cartes de vulnérabilité à la pollution des ressources en eau superficielles et souterraines du pays et par la protection des captages d'eau potable (barrages, forages, puits, sources, khettaras, etc) par des périmètres de protection.

La nouvelle loi sur l'eau du Maroc 10/95 impose la mise en œuvre de périmètres de protection autour des captages d'eau potable. Cependant, à ce jour aucun des captages d'eau potable n'est réellement protégé par ces zones de protection (en dehors des clôtures et des locaux techniques abritant le captage lui même et le matériel annexe de pompage).

L'objectif du présent guide est de présenter une démarche standard, à suivre par tout projet de délimitation des périmètres de protection des captages d'eau potable au Maroc.

2. PRESENTATION DU CONTENU DE LA PREMIERE PARTIE DU GUIDE : GENERALITES SUR LES EAUX SOUTERRAINES

Cette partie a pour objectif de présenter quelques notions fondamentales nécessaires à l'utilisateur du guide (consultants hydrogéologues, bureaux d'étude, agences hydrauliques de l'eau, administrations, etc) pour choisir la ou les méthodes (de délimitation des périmètres de protection des captages d'eau potable) les plus adaptées au contexte hydrogéologique local du captage à protéger.

Les notions suivantes sont rappelées:

- Définition et objectifs des périmètres de protection des captages d'eau potable

- Principaux paramètres hydrodynamiques d'une nappe d'eau souterraine

- Principaux paramètres de transfert d'une pollution dans une nappe d'eau souterraine

- Mécanismes de transfert de la pollution dans les eaux souterraines

- Zones d'écoulement autour d'un captage
  - Zone d'alimentation du captage
  - Zone d'influence du pompage
  - Zone d'appel du captage

- Différents types de captage d'eau souterraine

- Différentes géométries, origines et natures d'une pollution d'eau souterraine

- Vulnérabilité des nappes a la pollution
  - Paramètres influençant la vulnérabilité
  - Méthodes de caractérisation

- Critères de délimitation des périmètres de protection des captages d'eau potable

- Données nécessaires au dimensionnement des périmètres de protection des captages d'eau potable en milieu poreux
  - Données générales sur l'eau potable
  - Données relatives à l'aquifère capté
  - Données relatives au captage à protéger

3. PRESENTATION DU CONTENU DE LA DEUXIEME PARTIE DU GUIDE : METHODES DE DELIMITATION DES PERIMETRES DE PROTECTION DES CAPTAGES D'EAU SOUTERRAINES DESTINES A L'ALIMENTATION HUMAINE

Cette partie du guide est consacrée à la présentation :

- de la plupart des méthodes de délimitation des périmètres de protection des captages d'eau citées dans la littérature internationale;
- des contextes de leur utilisation;
- des données qu'elles utilisent;
- des avantages et inconvénients de chacune d'elles.

3.1 Approche Cartographique

Cette approche qualitative est basée sur l'analyse des faciès lithologiques des terrains de la couverture (sol et zone non saturée), de la forme de la surface piézométrique de la nappe, des conditions aux limites naturelles de l'aquifère capté (zones de recharge, limites d'alimentation, limites étanches, exutoires, etc.) pour la délimitation des zones de protection du captage, notamment sa zone d'alimentation. Les secteurs à protéger sont constitués en priorité par les zones principales de recharge de la nappe.

3.2 Approche empirique

3.2.1 Méthode de Rehse
Cette méthode consiste à estimer le pouvoir épurateur de la couverture (sol et zone non saturée) et celui de la zone saturée (la nappe) vis-à-vis d'une pollution lors de son transfert depuis la surface du sol jusqu'au captage à protéger. Cette capacité de filtration (atténuation de la concentration de la pollution) dépend du faciès lithologique et de l'épaisseur des terrains de la couverture, des caractéristiques de la zone saturée (lithologie et texture) et de la longueur du trajet empreinté par la pollution dans la nappe.

La méthode définit, pour chaque type de faciès rencontré par le polluant, un index (I) qui dépend de son pouvoir épurateur (vis-à-vis de cette pollution):

I = 1/H (H= longueur du trajet vertical dans la zone non saturée nécessaire pour avoir une épuration totale).

I= 1/L (L= longueur du trajet horizontal dans la zone saturée, nécessaire pour compléter l'épuration des formations de la couverture de la nappe).

Le pouvoir épurateur de l'ensemble des formations (M_x) traversées par le polluant correspond à la somme du pouvoir épurateur de la couverture (M_d) et celui de la zone saturée (M_r) : $M_x = M_d + M_r$. (1)

L'épuration est considérée totale lorsque M_x devient supérieure ou égale à 1. Dans le cas contraire (épuration incomplète), Mx est inférieure à 1.

3.2.2 Méthode géométrique

Cette méthode consiste à délimiter (pour chacune des zones de protection) un rayon fixe autour du captage à protéger quelque soit la nature lithologique de l'aquifère et le contexte hydrogéologique dans lequel se trouve le captage. Ce rayon est généralement de quelques dizaines de mètres pour le périmètre de protection immédiate (PPI), de quelques centaines de mètres pour le périmètre de protection rapprochée (PPR) et de quelques kilomètres pour le périmètre de protection éloignée (PPE).

3.3 Approche graphique

Méthode d'Albinet et al (1972)
Cette méthode simple consiste à tracer la carte de la surface dynamique de la nappe, obtenue lors du pompage d'essai pratiqué dans le captage à protéger.

Le tracé des lignes de courant permet de délimiter les zones d'appel et d'alimentation de ce captage.

3.4. Approche hydrodynamique

3.4.1 Méthodes volumiques

Méthode de l'Infiltration

Cette méthode consiste à établir un bilan de masse entre le volume d'eau prélevé par an, au niveau du captage, et le volume d'eau s'infiltrant (recharge moyenne annuelle) dans la zone d'alimentation du captage à protéger.

Dans le cas d'un puits unique, la zone d'infiltration (ou de recharge) est assimilée à un cercle de superficie A et de rayon r, dont les dimensions sont données par les relation 2 et 3 suivantes :

$$A = \frac{Q}{i} \qquad (2)$$

ou, $$r = \sqrt{\frac{Q}{\pi \times i}} \qquad (3)$$

Avec :

A = Superficie de la zone d'alimentation du captage (m^2)
r = Rayon de l'aire de recharge de la nappe équilibrant le débit prélevé (m)
Q= Débit maximum prélevé dans le captage (m^3/an)
i = Recharge de la nappe (m/an) équilibrant le débit (Q) prélevé dans le captage.

Méthode du Cylindre

Cette méthode consiste à établir le bilan de masse entre le volume d'eau extrait du captage pendant la durée de pompage (t) et le volume d'eau contenu dans un cylindre traversant la nappe captée. Le rayon du cylindre est assimilé à celui du PP rapprochée et il est évalué par la relation suivante:

$$r = \sqrt{\frac{Q_t}{\pi \times e \times n_e}} \qquad (4)$$

Avec :

r: rayon du cylindre (m), dont le volume permet d'équilibrer le débit prélevé dans le captage.
Q_t : volume d'eau (m^3) prélevé pendant la durée t de pompage (t est généralement de 50 jours).
e : épaisseur de la nappe (m).
n_e : porosité efficace de la nappe (sans dimension).

3.4.2 Méthodes analytiques

3.4.2.1. Méthode de Bear & Jacobs

Cette méthode est basée sur une résolution analytique de l'équation de l'écoulement de l'eau (en milieu poreux) dans le temps et dans l'espace. Elle permet de délimiter (dans le cas de milieux homogènes et isotropes) avec précision les périmètres de protection rapprochée et éloignée des captages d'eau potable.

Caractéristiques de la zone d'alimentation du captage

L'équation de la zone d'alimentation du captage en régime permanent s'écrit comme ci-dessous :

$$-\frac{y}{x} = \tan\left[\frac{2\pi K.e.i}{Q}y\right] \qquad (5)$$

Avec :

y : Largeur de la zone d'alimentation (m) à la distance x (m) du captage ;
x : distance au captage (m) ;
K : coefficient de perméabilité de la nappe (m/s) ;
e : épaisseur initiale de la nappe (m) ;
i : gradient hydraulique naturel de la nappe au voisinage du captage ;
Q : débit prélevé dans le captage (m^3/s).

La résolution analytique de l'équation 5 est difficile à obtenir, car elle contient 2 inconnus (x et y). La solution est obtenue par des méthodes graphiques.

La largeur de la zone d'alimentation (y) prend sa valeur maximale (B) lorsque x (distance amont du captage) tend vers l'infini (B).

$$B = \frac{Q}{K.e.i} \qquad (6)$$

Caractéristiques de la zone de protection rapprochée du captage

La détermination de l'isochrone (correspondant à la zone de protection rapprochée du captage) se fait à partir de la résolution de l'équation de l'écoulement en régime transitoire. Elle s'écrit comme ci-dessous (équation 7):

$$t = \frac{(x-x_W)n_C}{q_0} - \frac{Qn_C}{2\pi e(q_0)^2} \times Ln\left(\frac{\sin[2\pi \times e \times q_0 \times (y-y_W)/(Q\theta)]}{\sin\theta}\right) \qquad (7)$$

$$\theta = \text{Arc}\tan\left(\frac{y-y_W}{x-x_W}\right) \qquad (8)$$

$$q_0 = -K.i \qquad (9)$$

Avec :

t : temps de transfert de la pollution (secondes) entre un point de la nappe et le captage (généralement égal à 50 jours) ;
x_w et y_w : coordonnées du captage à protéger ;
x et y : coordonnées d'un point de la nappe ;
n_c : porosité cinématique de la nappe (sans dimension) ;
e : épaisseur saturée de la nappe au voisinage du captage (m) ;
Q : débit de pompage (m^3/s) ;
q_0 : vitesse de Darcy= K× i (m/s) ;
K : coefficient de perméabilité de la nappe (m/s) ;
i : gradient hydraulique de la nappe au voisinage du captage, dans les conditions de pompage (sans dimension).

La résolution analytique de l'équation 7 ci-dessus est difficile à obtenir. La solution approximative est obtenue par des méthodes itératives.

3.4.2.2 Méthode de Wyssling

Cette méthode dérive de celle de Bear & Jacobs et permet de calculer les caractéristiques de la zone d'alimentation et celles du périmètre de protection rapprochée en quelques points particuliers de la nappe, entourant le captage à protéger.

Caractéristiques de la zone d'alimentation de l'ouvrage

- Largeur maximale de la zone d'alimentation (B):

Cette largeur est identique à celle définie par la méthode de Bear & Jacobs (équation 6 ci-dessus).

- Largeur de la zone d'alimentation à la hauteur du captage (B'').

Elle est considérée égale à la moitié de la largeur maximale de la zone d'alimentation (B) :

$$B'' = \frac{B}{2} = \frac{1}{2}\left(\frac{Q}{K.e.i}\right) \qquad (10)$$

Limite avale de la zone d'alimentation du captage (point de stagnation, X_0) :

Elle est déterminée à partir de la relation suivante:

$$x_0 = \frac{Q}{2\pi.K.e.i} \qquad (11)$$

Caractéristiques du périmètre de protection rapprochée

Pour un temps t de transfert de la pollution donné (isochrone), la méthode de Wyssling permet de calculer les distances amont et avale du polluant (limites du PP rapprochée) selon l'axe principal de l'écoulement de l'eau dans la nappe, avec les équations suivantes :

$$S_0 = \frac{+I + \sqrt{I.(I+8x_0)}}{2} \qquad (12)$$

$$S_u = \frac{-I + \sqrt{I.(I+8x_0)}}{2} \qquad (13)$$

Avec :

- S_0 : distance amont du PP rapprochée sur l'axe principal de l'écoulement, correspondant au temps de

transfert t de la pollution dans la nappe (généralement de 50 jours) ;

- S_u : distance avale du PP rapprochée sur l'axe principal de l'écoulement, correspondant au temps t de transfert de la pollution dans la nappe;
- l (m) = Ve . t (l= longueur parcourue par un polluant dans la nappe pendant la durée t, avec la vitesse Ve) ;

- Ve = (K. i)/ne (14)

(K= coefficient de perméabilité (m/s), i= gradient hydraulique et ne= porosité efficace de la nappe).

3.4.2.3 Méthode de Todd

Cette méthode considère que le périmètre de protection rapprochée est représenté par un arc de cercle, dont le centre coïncide avec le captage et dont les limites latérales sont identiques à celles de la zone d'alimentation de ce dernier. La limite amont (S_0) du PP rapprochée (sur l'axe principal de l'écoulement de l'eau dans la nappe) est donnée par une relation, qui est une simplification de l'équation de Bear & Jacobs.

Caractéristiques de la zone d'alimentation du captage

Ces caractéristiques sont les mêmes que celles définies par les méthodes de Bear & Jacobs (équation 6) et de Wyssling (équations 10 et 11).

La méthode de Todd considère que la largeur maximale de la zone d'alimentation B (équation 6) est atteinte en amont du captage, à une distance L égale à B:

$$L = B = \frac{Q}{K..e.i} \qquad (15)$$

Avec :

B : Largeur maximale de la zone d'alimentation du captage (m) ;
L : Distance du captage (m) à partir de laquelle la zone d'alimentation du captage atteint sa valeur maximale (B);
Q : débit prélevé dans le captage (m^3/s) ;
K : coefficient de perméabilité de la nappe (m/s) ;
e : épaisseur de la nappe (m) ;
i : gradient hydraulique de la nappe au voisinage du captage (sans dimension).

Périmètre de protection rapprochée

La limite amont S_0 (en m) du périmètre de protection rapprochée est donnée par l'expression suivante:

$$t = \frac{n_e.S0}{K.i} - \frac{Q \times n_e}{2\pi K^2.i^2.e} \times Ln\left[1 + \frac{2\pi K.e.i.S0}{Q}\right] \qquad (16)$$

Avec :

t : temps de transfert de la pollution dans la nappe (s), généralement égal à 50 jours ;
n_e : porosité efficace de la nappe (sans dimension) ;
S_0 : limite amont du périmètre de protection rapprochée (m) sur l'axe principal de l'écoulement ;
K : perméabilité de la nappe (m/s) ;
i : gradient hydraulique de la nappe au voisinage du captage (sans dimension) ;
e : épaisseur de la nappe (m) ;
Q : débit prélevé au niveau du captage (m^3/s).
Les limites latérales du PP rapprochée sont considérées identiques à celles de la zone d'alimentation du captage.

3.2.2.4 Méthode de Hoffman et Lillich

Cette méthode permet de rechercher (par itérations successives) la distance amont du PP rapprochée du captage à protéger, correspondant au temps de transfert t de la pollution dans la nappe.

En pratique, le calcul de la limite du PP rapprochée se fait de la manière suivante :

a . On choisit une distance arbitraire l_1 du puits capté et on calcule le niveau dynamique (h_1) à cette distance avec les relations 17 ci-dessous.

$$(h^2 - h_w^2) = (h_0^2 - h_w^2).\frac{Ln(\frac{l}{r_w})}{Ln(\frac{R}{r_w})} \qquad (17)$$

Avec :

h : niveau piézomètrique rabattu (niveau dynamique en m), correspondant à un point de la nappe situé à la distance l (m) du captage ;
h_w : niveau piézomètrique rabattu (niveau dynamique en m), mesuré au niveau du captage ;
h_0 : niveau piézomètrique de la nappe au repos (m) ;
l : distance par rapport au captage (m) ;
r_w : rayon du puits (m) ;
R : rayon d'influence (distance du captage à partir de laquelle le rabattement est nul (m).

b. On calcule le gradient hydraulique i_1 de la nappe entre ce point (situé à une distance l_1) et le captage par la relation suivante :

$$i_1 = \frac{h_1 - h_w}{l_1} \qquad (18)$$

c. On calcule la vitesse effective de la nappe (V_e) au voisinage du captage (équation 14) ;

d. On calcule une première valeur de la limite du périmètre de protection rapprochée (E_1 en m), correspondant à un temps de transfert (t) de la pollution, à partir de l'équation 19 ci-dessous ;

e. Si la distance E_1 est différente de la distance arbitraire l_1, on choisit une deuxième distance l_2 comprise entre l_1 et E_1.

f. On refait la même procédure autant de fois que c'est nécessaire jusqu'à ce qu'on aboutisse à une égalité entre les distances l_x et E_x, correspondant au temps (t, choisi) de transfert de la pollution dans la nappe.

$$E_t\,(m) = 86400.V_e.t \qquad (19)$$

Avec :

K : perméabilité de la nappe (m/s)
i : gradient hydraulique de la nappe au voisinage du captage (sans dimension)
n_e : porosité efficace de la nappe (sans dimension)
V_e : vitesse effective de l'eau dans la nappe (m/s)
t : temps de transfert de la pollution dans la nappe (jours), fixé généralement à 50 jours
E : distance en amont du captage (m), correspondant au temps de transfert (t) de la pollution.

3.2.2.5 Méthode de Sauty & Thierry

Cette méthode considère d'une part le captage (à protéger) comme le seul exutoire d'une nappe d'extension infinie et que d'autre part le transfert de la pollution, dans la zone saturée, se fait uniquement de façon convective.

Les isochrones ont une forme ovale et sont inscrites à l'intérieur de la zone d'alimentation du captage.

Données nécessaires :

Q : débit de pompage (m^3/h)
e : épaisseur de la nappe (m)
n_c : porosité cinématique de la nappe (sans dimension)
T : transmissivité de la nappe (m^2/h)
I : gradient hydraulique régional de la nappe hors pompage (sans dimension)
T : durée de transfert de la pollution dans la nappe (jours).

Différentes étapes de la méthode :

a- Calcul du nombre adimensionnel t'':

$$t'' = \frac{48T^2 i^2 t}{n_e e Q} \qquad (20)$$

b- Recherche sur l'abaque des courbes successives graduées t''_1 et t''_2, tel que $t''_1 < t'' < t''_2$, puis tracé, par interpolation, de la courbe correspondante au temps t".

c- Mesure (sur l'abaque) des distances aux axes principaux, de quelques points repérés sur la courbe interpolée (correspondant à t''). L'abaque a été élaboré de façon à lire les distances d' en centimètres.

d- Tracé, sur le fond cartographique de travail (carte hydrogéologique contenant le captage), des axes parallèle et perpendiculaire à l'écoulement principal passant par le captage. La zone d'alimentation devra être placée dans la partie droite du graphique.

e- Report, sur le fond cartographique de travail, des points repérés sur la courbe interpolée correspondante à t'' (tracée dans l'étape b), en utilisant la formule de conversion ci-dessous (21).

f- Tracé de l'enveloppe du périmètre de protection rapprochée, correspondant au temps de transfert de la pollution utilisé pour le calcul du temps adimensionnel.

$$d = \frac{Q.d'}{20.T.i} \qquad (21)$$

Avec :

d' : distance mesurée sur l'abaque (cm) ;

d : distance réelle (m) ;

Q : débit (m^3/s) ;

T : transmissivité de la nappe (m^2/s) ;

i : gradient hydraulique naturel de la surface de la nappe (sans dimension).

3.2.2.6 Méthodes numériques

Les modèles mathématiques permettent d'approximer la résolution exacte de l'équation de l'écoulement par des méthodes numériques de différences finies ou d'éléments finis. Cette résolution revient à approximer la distribution spatiale et l'évolution temporelle des charges hydrauliques dans la nappe.

La résolution, par différences finies, de l'équation de l'écoulement en régime permanent permet de calculer la charge hydraulique au centre de chaque maille du modèle :

En régime permanent, la somme des débits entrants est égale à celle des débits sortants ; c'est-à-dire que la variation du stock d'eau dans chaque maille du modèle est nulle, ce qui s'écrit sous la forme:

$$S.\frac{\partial H}{\partial t} = 0 \qquad (22)$$

L'équation de Darcy en régime permanent s'écrit sous la forme :

$$\frac{\partial}{\partial x}.T.\frac{\partial H}{\partial x} = 0 \qquad (23)$$

La résolution de cette équation (en régime permanent) au niveau de chaque maille du modèle, avec la méthode des différences finies, s'écrit :

$$\sum_i T_i.[H_C - H_i] + Q = 0 \qquad (24)$$

La charge hydraulique au centre de chaque maille du modèle est approximée par la relation suivante :

$$H_C = \frac{\sum (T_i . + H_i) + Q}{\sum T_i} \qquad (25)$$

Avec :

H_c : Charge hydraulique moyenne au centre de la maille (m)
T_i : Transmisivité moyenne au niveau de chaque maille (m^2/s) entourant la maille centrale
Q : Prélèvement ou recharge effectuée au niveau de chaque maille (m^3/s) du modèle de la nappe.

Délimitation des périmètres de protection au moyen des modèles numériques
Cette délimitation se fait à partir du calcul du champs de vitesse dans la nappe et du tracé des trajectoires d'eau souterraine.

Les vitesses de l'écoulement de l'eau selon l'axe X (ou Y ou Z) sont calculées par la relation ci-dessous:

$$V_X = \frac{K_X}{n_C} . \frac{\partial H}{\partial x} \qquad (26)$$

Avec :

K_x : perméabilité de la nappe selon l'axe principal des écoulements (m/s)
nc : porosité cinématique de la nappe (sans dimension)

La vitesse de l'écoulement de l'eau est définie également par la relation ci-dessous :

$$V_X = \frac{\partial x}{\partial t} \qquad (27)$$

Les coordonnées d'une particule d'eau en écoulement après un instant dt (entre les instants t et t+dt) sont données par la relation ci-dessous :

$$X_{(t+dt)} = X_{(t)} + V_x . dt \qquad (28)$$

Le suivi des particules dans la nappe, se fait à travers le calcul des coordonnées successives empreintées par l'écoulement de l'eau. L'ensemble des lignes de courant, aboutissant au captage, permet de délimiter sa zone d'alimentation.

Le périmètre de protection rapprochée d'un captage est délimité à partir du calcul des isochrones dans la nappe. Ces dernières sont des courbes joignant l'ensemble des particules qui ont mis le même temps pour parcourir la même distance en partant de la même maille du modèle.

3.5 Approche mixte

Méthode 3A2E

Cette méthode développée par D. Paradis en 2000 à l'INRS-Eau du Canada, permet de calculer les dimensions du périmètre de protection éloignée et rapprochée d'un captage d'eau souterraine en milieu poreux, par la combinaison des trois approches suivantes: cartographie hydrogéologique, empirique (cylindre et recharge) et hydrodynamique.
Son nom 3A2E est un acronyme, constitué des initiales des cinq étapes (suivantes) la constituant :

Étape 1 : consiste en la détermination des limites **Avales** de la zone d'alimentation et celles du périmètre de protection rapprochée et éloignée du captage. Ces limites peuvent être calculées à partir des équations de Bear & Jacobs, ou celles de Wyssling (combinée avec les méthodes de l'Infiltration et du Cylindre) ou à partir de la cartographie hydrogéologique.

Étape 2 : consiste en la détermination des limites **Amont** de la zone d'alimentation et du périmètre de protection rapprochée et éloignée du captage. Ces limites peuvent être calculées à partir des équations de Bear & Jacobs, ou celles de Wyssling (combinée avec les méthodes du Cylindre et de l'Infiltration de la nappe) ou à partir de la cartographie hydrogéologique.

Étape 3 : consiste à calculer **les Aires totales** des zones de recharge et du périmètre de protection rapprochée du captage. Les équations de l'Infiltration et du Cylindre sont utilisées respectivement pour le calcul de ces superficies.

Étape 4 : consiste en la détermination de la direction principale de **l'Ecoulement régional** de l'eau souterraine, à partir de la carte piézométrique de la nappe.

Étape 5 : consiste à tracer une **Ellipse** pour chacune des zones à délimiter (périmètres de protection rapprochée et éloignée du captage), dont les superficies sont calculées dans l'étape 3 de la méthode. Les axes principaux de ces deux ellipses coïncident avec le sens de l'écoulement principal de la nappe (déterminé à l'étape 4). Les extrémités de ces zones correspondent aux limites avale et amont calculées respectivement dans les étapes 1et 2.

4 RECOMMANDATION D'UNE METHODOLOGIE DE DELIMITATION DES PP DES CAPTAGES D'EAU POTABLE EN MILIEU POREUX

4.1 Cas d'un captage exploitant une nappe non vulnérable à la pollution

La protection des captages exploitant ce type de nappes, par des périmètres de protection rapprochée et éloignée, n'est pas nécessaire. Seul un PP immédiate est nécessaire, dont le rayon devra être compris entre 10 et 30 m.

La mise en place d'une ceinture de sécurité autour du champs captant est également recommandée. Elle peut être constituée par des points d'eau existants ou par de nouveaux ouvrages (puits ou de sondages à réaliser), permettant de contrôler régulièrement la qualité de l'eau,

notamment en aval immédiat des activités génératrices de pollution inventoriées dans la zone d'alimentation du captage à protéger.

En cas d'absence d'activités polluantes au voisinage du champs captant, les ouvrages constituant la ceinture de sécurité devront être implantés à une distance suffisante du captage, permettant d'avoir des délais suffisants (au moins 50 jours, en cas de pollution de la nappe.

4.2 Cas d'un captage unique exploitant une nappe homogène et isotrope et vulnérable à la pollution

Nous recommandons l'utilisation en priorité de la méthode analytique de Bear & Jacobs. L'utilisation de cette méthode peut être facilitée par l'utilisation de logiciels spécifiques, du type ParaPol ou PeriProtect *(en cours de finalisation au centre d'études et de recherches en ressources en eau, CERHYDREAU, de l'EHTP).*

Dans le cas où l'utilisateur ne dispose pas de logiciel adapté, il est recommandé d'utiliser la méthode 3A2E, car elle donne des résultats proches (limites des périmètres de protection éloignée et rapprochée) de ceux calculés avec des modèles mathématiques des nappes (Paradis, 2000).

4.3 Cas d'un champs captant multiple ou exploitant une nappe anisotrope, hétérogène et vulnérable à la pollution

Dans ce cas, seule la modélisation hydrogéologique pourra permettre une délimitation précise des différentes zones de protection des ouvrages constituant le champs captant.

La délimitation de ces zones de protection devra donc se faire après l'élaboration d'une étude hydrogéologique complète, basée sur des données fiables et en quantité suffisante (campagnes géophysiques, coupes lithologiques des forages, résultats de pompages d'essai, mesures et historiques piézométriques, bilan de la nappe, analyses physico-chimiques et bactériologique et (le cas échéant) les résultats d'expériences de traçage pour la détermination des paramètres hydrodispersifs et de la vitesse de transfert de la pollution dans la nappe captée).

Dans les cas d'aquifères vulnérables à la pollution, une distance minimale de 100 m devra séparer les périmètres de protection rapprochée des captages d'AEP à protéger, et ce qu'elle que soit la distance calculée avec les différentes méthodes utilisées.

4.4 Délimitation des périmètres de protection éloignée des captages d'eau potable (PPE)

4.4.1 Limite avale

Nous recommandons d'utiliser la limite avale de la zone d'alimentation du captage à protéger, appelée aussi point de stagnation.

4.4.2 Limite amont

Nous envisageons les deux cas suivants:

- si les limites de la nappe captée ne sont pas trop éloignées de l'ouvrage à protéger (distance inférieure à 10 kilomètres), le PP éloignée devra s'étendre entre les limites extérieures du PP rapprochée et les limites naturelles de la nappe contenues dans la zone d'alimentation du captage à protéger ;

- si les limites de la nappe sont trop éloignées (plus de 10 kilomètres), le PP éloignée devra s'étendre jusqu'aux limites de la zone d'alimentation également, mais les servitudes devront être appliquées en priorité sur l'étendue de la surface d'infiltration (recharge à partir de la surface du sol) de la nappe équilibrant le débit prélevé dans le captage à protéger.

BIBLIOGRAPHIE

Albinet, M., Derec, F., Cottez, S., Peaudecref, P. 1972. Contribution à la délimitation des périmètres de protection des captages d'eau souterraine : Essai de détermination de l'aire d'alimentation de captages en nappes libres. *Note technique n° 3, BRGM 72 SGN 370 AME.*

Banton, O., Bangoy, L. 1997. Hydrogéologie multiscience environnementale des eaux souterraines. *Press de l'Université du Québec, AUPELF, 460 p.*

Banton, O., Lafrance, P., Villeneuve, J.P. 1987. Développement d'un nouvel outil simple et adaptable pour l'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la contamination par les pesticides. Rapport scientifique. *INRS-Eau,Québec, n° 233a.*

Bulletin officiel du Maroc n° 4325., 1995. Loi n° 10 - 95 sur l'eau au Maroc.

EPA. 1987. Guidelines for delineation of wellhead protection area.

Karanta, G., Martel, R., Nastev, M., Therrien, R., Paradis, D., Lefebvre, R. 2001. Comparative study of methods for wellhead protection area delineation in fractured rocks. Bul. AIH, pp. 1350-1357.

Lallemand-Barres, A., Roux, J.C. 1999. Périmètres de protection des captages d'eau souterraine destinée à la consommation humaine. *Manuels et Méthodes n° 33. BRGM.*

Paradis, D. 2000. Comparaison des méthodes de détermination des périmètres de protection des ouvrages de captage d'eau souterraine dans les aquifères granulaires du piémont laurentien. *Mémoire de maîtrise, INRS-GeoRessources, Univ. du Québec. 138 p.*

Sauty, J. P., Thiery, D. 1975. Utilisation d'abaques pour la détermination des périmètres de protection. *BRGM 75 SGN 430 AME.*