



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ ZIANE ACHOUR- DJELFA
FACULTÉ DES SCIENCES DE LA NATURE ET DE LA VIE
DÉPARTEMENT DES SCIENCES AGRONOMIQUES ET VÉTÉRINAIRES

COURS

Qualité des eaux souterraines et superficielles

DESTINÉ AUX ÉTUDIANTS DE :

1^{ÈRE} ANNÉE MASTER, EAU ET ENVIRONNEMENT

Présenté par : Dr. BOUTELDJAOUI Fatah, MCB, Université Ziane Achour-
Djelfa

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2022/2023

Chapitre III : Évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution

III.1 Evaluation de la vulnérabilité

III.1.1 Concept de vulnérabilité

Plusieurs définitions ont été données à la vulnérabilité :

La vulnérabilité des nappes correspond à la possibilité de **pénétration** de la **propagation des polluants** dans les terrains rencontrés en surface et au niveau des réservoirs dans lequel est contenue la première **nappe d'eau souterraine**, généralement **libre**. (Albinet ,1970).

la vulnérabilité des nappes à la pollution est définie comme leur **sensibilité** aux différents facteurs de contaminations à partir de la **surface du sol**, c'est l'étude des possibilités de la **propagation des polluants** dans l'espace souterrain, lié à **l'autoépuration naturelle du sol**, donc à la présence des conditions indispensables à son action, elle est favorisée par la circulation de l'eau. (Castany .G 1982).

On distingue deux types de vulnérabilité. La vulnérabilité **intrinsèque** et la **vulnérabilité spécifique** (S.Bézègues et al 2002):

- **La vulnérabilité intrinsèque** : est utilisée pour représenter les caractéristiques du **milieu naturel** qui détermine la **sensibilité** des **eaux souterraines** à la pollution par les **activités humaines**. Cette définition considère que la substance est appliquée directement en surface est voyage au même rythme que l'eau. Le **type de contaminant**, la **vitesse de migration** et la **dégradation des contaminants** ne sont pas considérés.
- **La vulnérabilité spécifique** : est le terme utilisé pour définir la vulnérabilité d'une eau souterraine à un **polluant particulier** ou à un **groupe de polluants**. Elle prend en compte les **propriétés des polluants** et leurs relations avec les divers composants de la **vulnérabilité intrinsèque**.

III.1.2 Les facteurs de vulnérabilité intrinsèque.

III.1.2.1 Les facteurs relatifs au sol :

Dans le processus de l'infiltration des polluants à la nappe, les **propriétés du sol** influent largement sur le **mécanisme de transfert**, entre autres, la **texture**, la **porosité**, la **composition minéralogique et chimique**, la **teneur en argiles** et en **matière organique**. La **topographie** du sol joue aussi un rôle important dans le processus de **migration** du **polluant** vers la **nappe**, elle conditionne la détermination des **zones d'infiltration préférentielle** de la nappe. De ce fait, elle peut être considérée représentative de la **recharge efficace** de la **nappe**.

III.1.2.2 Les facteurs relatifs à la zone non saturée :

➤ **Profondeur de la nappe libre** (ou **épaisseur de la zone non saturée**) : **épaisseur** de la zone non saturée (**ZNS**) conditionnent le **temps de transfert** d'un **polluant** jusqu'à la nappe (**rétenion, stockage, interaction physico-chimique** avec l'**encaissant**) et donc sa possibilité de dégradation au cours du transfert.

➤ **Perméabilité verticale de la ZNS :**

Elle dicte le **temps de transfert vertical** d'un polluant de la **surface du sol** vers la **nappe**.

➤ **Structure de la ZNS :** la **texture**, la **teneur en matière organique** et en **argile** Les **variations de faciès**, le **degré d'hétérogénéité** et le degré de **fissuration** de la zone non saturée, constituent autant de facteurs qui conditionnent la propagation d'un polluant jusqu'à la nappe.

III.1.2.3 Les facteurs relatifs à la zone saturée :

Type de nappe (libre ou captive) :

Il va de soi qu'une nappe libre dépourvue d'un horizon imperméable entre le toit et la surface du sol, est **plus vulnérable à la pollution** de surface qu'une **nappe d'eau captive** qui est protégée par des **horizons imperméables**.

➤ **Paramètres hydrodynamiques :** ils déterminent la **vitesse de propagation** des polluants dans la nappe ainsi que le **temps de séjours** dans la **zone saturée**. Ces paramètres hydrodynamiques sont ; la **transmissivité (T)**, La **perméabilité (K)**, le **coefficient d'emmagasinement (S)**, le **gradient hydraulique (i)**.

➤ **Piézométrie** : Elle rend compte de la **géométrie** de la **nappe** et de son **fonctionnement hydrodynamique** qui peuvent évoluer au cours d'un **cycle hydrologique complet**. Entre les périodes de **hautes eaux** et **basses eaux** les **directions d'écoulement** et les relations eaux **superficielles/eaux souterraines** peuvent s'inverser.

➤ **Direction et sens d'écoulement** : Ils déterminent les espaces susceptibles d'être atteint par un **polluant** une fois que celui-ci a **atteint la nappe**.

4. Méthodes existantes de cartographie de la vulnérabilité intrinsèque des aquifères

4.1. La méthode DRASTIC

Présentation de la méthode DRASTIC (ALLER et al., 1987)

La méthode DRASTIC a été développée par l'Agence Américaine de Protection de l'Environnement (ALLER et al., 1987). L'objectif était de réaliser une méthode d'estimation de la vulnérabilité intrinsèque applicable aux conditions hydrogéologiques rencontrées aux États-Unis. Il existe deux versions de la méthode DRASTIC : la version DRASTIC standard, appliquée dans le cas où les contaminants considérés sont des polluants inorganiques (HAMZA et al., 2007). La version DRASTIC pesticides est appliquée dans le cas où les contaminants considérés sont des pesticides, pour cette raison, la pondération diffère de la version DRASTIC standard appliquée dans le cas des polluants inorganiques (HAMZA et al., 2004).

La méthode DRASTIC repose sur les hypothèses suivantes (ALLER et al., 1987; YAO, 2018):

- les sources de contamination potentielles se trouvent à la surface du sol ;
- de la surface du sol, les contaminants potentiels atteignent l'aquifère par le mécanisme d'infiltration efficace ;
- la nature des contaminants potentiels n'est pas prise en compte dans le calcul des indices.
- Le territoire d'application couvre plus de 0,4Km²

Les paramètres de la méthode DRASTIC (Figure11)

L'acronyme DRASTIC considère sept paramètres hydrogéologiques, correspond aux initiales des facteurs déterminant la valeur de l'indice de vulnérabilité (HAMZA et al., 2007; TRÉPANIÉ, 2008; YAO, 2018, EL KAYSSI et al., 2020).

- **D** : (**Depth to groundwater**) pour la profondeur de la nappe souterraine

- **R** : (**Recharge**) pour la recharge efficace de la nappe ;

- **A** : (**Aquifer media**) pour la nature lithologique de l'aquifère ;

- **S** : (**Soil media**) pour type de sol ;
- **T** : (**Topography**) pour pente topographique du terrain ;
- **I** : « **Impact of the vadose zone** » pour l'impact de la **zone non saturée** ;
- **C** : (**Conductivity**) pour la **conductivité hydraulique**.

Chaque paramètre est pondéré par un facteur multiplicateur variant de **1** à **5** selon son importance (**ALLER et al., 1987**). Un **paramètre prépondérant** est affecté d'un **poids** équivalent de "**5**" alors qu'un paramètre ayant moins d'influence sur le devenir d'un contaminant se voit assigner un poids de "**1**".

Chaque paramètre est classé en classes associées à des cotes variant de **1** à **10** (**ALLER et al., 1987**). La plus petite cote représente les conditions de plus faible vulnérabilité à la contamination.

Indice de vulnérabilité DRASTIC

Après avoir défini les différentes classes pour chacun des paramètres susmentionnés, il devient alors possible de calculer l'indice de la vulnérabilité **DRASTIC (ID)**. L'indice de vulnérabilité DRASTIC est calculé en faisant la **somme** des **produits** des **cotes** par les **poids** des paramètres correspondants (**ALLER et al., 1987**):

$$ID = Dp.Dc + Rp.Rc + Ap.Ac + Sp.Sc + Tp.Tc + Ip.Ic + Cp.Cc$$

p : le poids du paramètre

c : la cote associée.

L'indice **DRASTIC** final obtenu permet de caractériser le degré de vulnérabilité d'un secteur donné de la nappe et il varie entre **23** et **226**. La vulnérabilité est d'autant plus importante que l'indice (ID) calculé est élevé (**HAMZA et al, 2007**). Les valeurs obtenues sont regroupées, selon **ALLER et al. (1987)**, en cinq classes dont chacune correspond à un degré de vulnérabilité (Tableau 2). Les valeurs obtenues sont classées en quatre classes (**Tableau 2**). D'autre part, **ENGEL et al. (1996)** propose la classification des valeurs en quatre autres classes (**Tableau 3**).

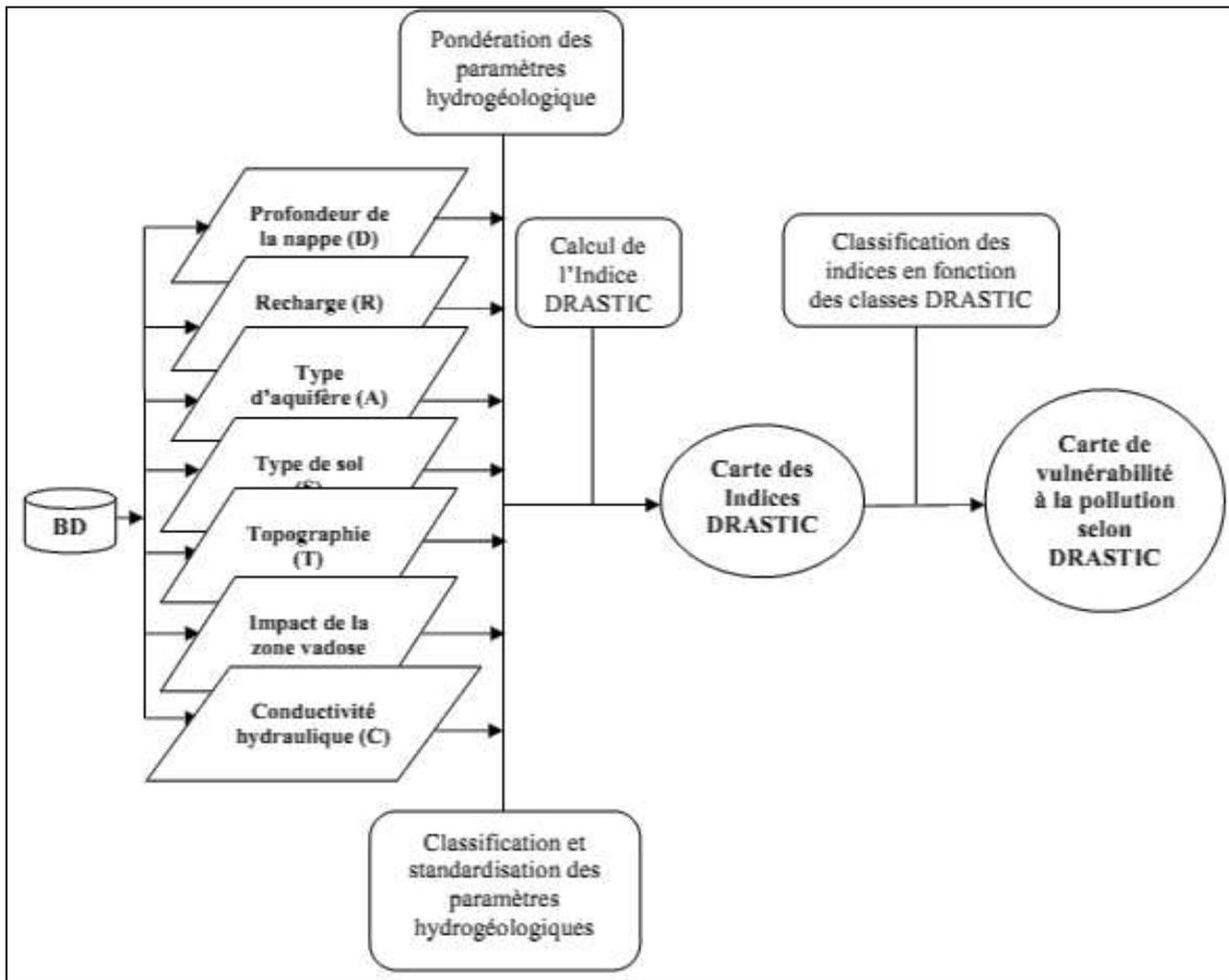


Figure11. Organigramme de la réalisation de la carte de vulnérabilité à la pollution à partir de la méthode **DRASTIC** (KOUDOU, 2016).

Tableau 1 : Propriétés et le poids de chaque paramètre DRASTIC (JOURDA, 2005)

Paramètres	Symbole	Propriétés	Poids
Profondeur de la nappe	D	Plus cette profondeur est élevée, plus le contaminant met de temps pour atteindre la surface piézométrique	<u>5</u>
Recharge de la nappe	R	Vecteur principal pour le transport du contaminant. Plus cette recharge est grande, plus le risque de contamination est élevé.	<u>4</u>
Lithologie de l'Aquifère	A	Caractérisée par la granulométrie des terrains saturés. Elle intervient dans le piégeage du polluant qui peut échapper au pouvoir d'adsorption du sol . Plus cette granulométrie est fine, plus le piégeage du polluant est grand.	<u>3</u>
Sol	S	Plus le sol est riche en argile , plus l'adsorption des métaux lourds est importante et plus la protection des eaux souterraines est grande .	<u>2</u>
Topographie	T	Plus la pente des terrains est grande , plus le ruissellement des eaux est important et par conséquent la contamination des eaux souterraines est faible.	<u>1</u>
Zone non saturée	I	Son impact est déterminé à partir de la texture des terrains qui la constituent. La percolation du polluant jusqu'à la surface piézométrique est d'autant plus grande que cette texture est favorable (graviers, sable grossiers).	<u>5</u>
Conductivité	C	Plus ce paramètre est grand , plus le transfert du polluant est rapide	<u>3</u>

Tableau 2 : Critères d'évaluation de la vulnérabilité dans la méthode DRASTIC (ALLER et al., 1987).

Degré de vulnérabilité	Indice de vulnérabilité
Très faible	< 80
Faible	80-120
Moyen	121-160
Élevé	161 - 200
Très élevé	> 200

Tableau 3 : Critères d'évaluation de la vulnérabilité dans la méthode DRASTIC (ENGEL et al., 1996).

Degré de vulnérabilité	Indice de vulnérabilité
Faible	< 101
Moyen	101 - 140
Élevé	141 - 200
Très élevé	> 200

4.2. La méthode SINTACS (CIVITA, 1994)

Présentation de la méthode

La méthode SINTACS, développée par CIVITA en 1994, est la version italienne de la méthode DRASTIC : c'est une adaptation de cette méthode aux conditions méditerranéennes (HAMZA et al, 2007). Cette méthode prend en considération les mêmes paramètres que la méthode DRASTIC avec des poids et des cotes différentes.

Les paramètres de la méthode SINTACS

L'acronyme SINTACS désigne les paramètres suivants (CIVITA ,1990; CIVITA ,1994) :

S: Soggiacenza : profondeur de la nappe

I: Infiltrazione efficace : Recharge

N: Non saturo : zone vadose

T: Tipologia dela opertura : nature du sol

A: Acquifero : Milieu aquifère

C: Conductibilita idraulicà: Conductivité hydraulique

S: Superficie topografica: pente du terrain

Indice de vulnérabilité SINTACS

L'indice SINTACS est donné par la formule suivante :

$$I_{SINTACS} = S_R S_W + I_R I_W + N_R N_W + T_R T_W + A_R A_W + C_R C_W + S_R S_W$$

Où **R**: rating : cote.

W: weight : poids.

Concernant les **poids**, la méthode donne **cinq scénarios différents** (Tableau 4).

Quatre classes de vulnérabilité peuvent être identifiées selon les valeurs des indices de vulnérabilité (Tableau 5).

Tableau 4 : **Poids** attribués aux paramètres **SINTACS** dans les différents scénarios de la méthode (CIVITA ,1994).

Scénario/ Paramètre	Impact Normal	Impact Sévère	Drainage Important	Karst	Terrains Fissurés
S	5	5	4	2	3
I	4	5	4	5	3
N	5	4	4	1	3
T	4	5	2	3	4
A	3	3	5	5	4
C	3	2	5	5	5
S	2	2	2	5	4

La spécificité de cette méthode consiste au fait qu'elle propose **cinq scénarios différents** :

- **Impact Normal** : scénario relatif aux aquifères constitués par des **sédiments non consolidés** avec une **profondeur de la nappe qui n'est pas très élevée**, localisés dans des aires à sols épais (HAMZA et al, 2007). Les zones relatives à ce scénario correspondent aux régions où les transformations sont rares, avec existence ou non de terres cultivées et une **utilisation très faible de pesticides, de fertilisants et d'irrigation, et aux périmètres urbains très dispersés** (HAMZA et al, 2007, HAMZA et al, 2008) ;
- **Impact sévère** : correspond aux mêmes types d'aquifères soumis à une **occupation des sols intensive**, avec des **terres cultivées à forte utilisation de pesticides, de fertilisants et d'irrigation**, des **implémentations industrielles et urbaines denses** et des dépôts liquides et solides de déchets (HAMZA et al, 2007, HAMZA et al, 2008).
- **Drainage important à partir d'un réseau superficiel** : scénario relatifs aux aires où il y a une forte infiltration vers l'aquifère à partir d'un **réseau superficiel d'eau Terrain très karstifié** : concernant les aires caractérisées par une forte **karstification** (HAMZA et al, 2007)
- **Terrain fissure** : correspondant aux **zones caractérisées** par une **forte fracturation** (HAMZA et al, 2007).

Tableau 5 : Critères d'évaluation de la vulnérabilité dans la méthode SINTACS.

Degré de vulnérabilité	Indice de vulnérabilité
Faible	< 106
Moyen	106 - 186
Élevé	187 - 210
Très élevé	> 210

4.3. La méthode GOD (FOSTER, 1987)

Présentation de la méthode

La méthode **GOD** est une méthode de systèmes paramétriques développée par FOSTER en Angleterre en 1987 (FOSTER, 1987). Elle présente la vulnérabilité de l'aquifère face à la percolation verticale de polluants à travers la zone non saturée et ne traite pas la migration latérale des polluants dans la zone saturée.

Les paramètres de la méthode GOD

L'acronyme GOD désigne les paramètres suivants (FOSTER, 1987, MURAT et al., 2003) :

G: Groundwater occurrence : type de nappe.

O: Overall aquifer class: type d'aquifère en termes de facteurs lithologiques.

D: Depth to groundwater table : profondeur de la nappe.

L'établissement de cette méthode est basé sur quatre points (MURAT, 2000) :

1) La vulnérabilité des aquifères est logiquement une fonction de :

- L'inaccessibilité de la zone saturée, au sens hydraulique de pénétration du polluant
- La capacité d'atténuation de la couche supérieure de la zone saturée comme résultat de la rétention physique et des réactions chimiques avec les contaminants.

2) Les deux propriétés énoncées ci-dessus interagissent avec celles correspondant à la mise en place des contaminants près de la surface c'est-à-dire :

- Le mode de répartition d'un contaminant proche de la surface, et en particulier la magnitude de la charge hydraulique associée
- La classe du contaminant en termes de mobilité et de persistance.

3) Il est plus réaliste d'évaluer la vulnérabilité par contaminant, classe de contaminant ou par groupe d'activités polluantes plutôt que de parler globalement de vulnérabilité.

4) Les cartes de vulnérabilités sont représentatives sous forme de cartes, mais la conclusion logique d'une telle étude est une série de cartes spécifiques compilées sous forme d'atlas.

Les cotes attribuées aux classes des différents paramètres sont inférieures ou égales à "1" et l'indice GOD (I_{GOD}), qui permet d'évaluer la vulnérabilité de l'aquifère à la pollution, est obtenu par la multiplication de ces trois paramètres. Les indices GOD sont compris entre "0" et "1" le degré de vulnérabilité augmente avec l'indice I_{GOD} (FOSTER, 1987, MURAT et al., 2003).

Indice de vulnérabilité GOD

L'indice GOD est donné par la formule suivante (FOSTER, 1987) :

$$I_{GOD} = Gr \times Or \times Dr$$

Où: r: raiting: côte.

D'une manière générale, les indices GOD sont répartis en cinq classes de vulnérabilité allant du "très faible" à "extrême" (Tableau 9). Le degré de vulnérabilité augmente avec l'indice GOD (I_{GOD}).

Tableau 6 : Cotes attribuées au paramètre «type d'aquifère» selon la méthode GOD (MURAT et al., 2003).

Type d'aquifère	Cote
Aucun aquifère	0
Artésien	0,1
Confine	0,2
Semi-confine	0,3
Libre avec couverture	0,4-0,6
Libre	0,7-1

Tableau 7 : Cotes attribuées au paramètre «impact de la zone vadose» selon la méthode GOD (MURAT et al., 2003).

Lithologie	cote
Sol résiduel	0,4
Limon alluvial, loess, shale, calcaire fin	0,5
Sable éolien, siltite, tuf, roches ignées ou métamorphiques fracturées	0,6
Sable et gravier, grès	0,7
Gravier (colluvion)	0,8
Calcaire	0,9
Calcaire fracturée ou karstique	1

Tableau 8 : Cotes attribuées au paramètre «Profondeur de la nappe» selon la méthode GOD (MURAT et al., 2003) .

Profondeur de la nappe (m)	cote
>100	0,4
50-100	0,5
20-50	0,6
10-20	0,7

5-10	0,8
2-5	0,9
<2	1

Tableau 9 : Classification de l'indice GOD en fonction du degré de vulnérabilité (MURAT et al., 2003).

Intervalle	Classe GOD
0	Aucune vulnérabilité
0 à 0,1	Vulnérabilité très faible
0,1 à 0,3	Vulnérabilité faible
0,3 à 0,5	Vulnérabilité modérée
0,5 à 0,7	Vulnérabilité forte
0,7 à 1	Vulnérabilité extrême