



# EVALUATION DE LA VULNERABILITE A LA POLLUTION DES EAUX SOUTERRAINES DU DISTRICT DE CHAOYANG, BEIJING, CHINE

MEMOIRE POUR L'OBTENTION DU  
**DIPLOME D'INGENIEUR 2iE AVEC GRADE DE MASTER DANS LA SPÉCIALITÉ  
GENIE CIVIL ET HYDRAULIQUE OPTION INFRASTRUCTURES ET RESEAUX  
HYDRAULIQUES**

---

Présenté et soutenu publiquement le 05 Juillet 2017 par

**Sarah Fatim CAMARA**

**Travaux dirigés par :**

**Dr. Mahamadou KOÏTA**

Enseignant – Chercheur en  
hydrogéologie

Institut International de l'Eau et de  
l'environnement (2iE)

**Prof. Zhang Yongxiang**

Directeur du laboratoire de Pékin pour la  
science de la qualité de l'eau et  
l'ingénierie de récupération de l'eau

Beijing University of Technology (BJUT)

Jury d'évaluation du stage :

Président : Dr. Angelbert Chabi BIAOU

Membres et correcteurs : Dr. Mahamadou KOÏTA

Dr. Jean-Pierre SANDWIDI

M. Moussa FAYE

**Promotion [2015/2016]**



## DEDICACE

*À celui qui créa toute chose  
Pour toutes ses grâces et ses bénédictions dans ma vie,  
À mon père CAMARA Youssouf et à ma mère KOUASSI Affoué Cécile,  
Qui n'ont eu de cesse de se battre afin que je puisse arriver là où je suis,  
Que Dieu m'accorde le succès afin que vous soyez honorés  
Je vous dédie cette œuvre en guise de reconnaissance.*



## REMERCIEMENTS

Il ne serait pas judicieux d'entamer la rédaction de ce mémoire sans au préalable adresser nos remerciements à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué au succès de ce stage et ont été d'un apport appréciable à l'élaboration de ce travail. Notre gratitude est adressée à :

**M. ZHANG YONGXIANG, Directeur** du laboratoire de Pékin pour la science de la qualité de l'eau et l'ingénierie de récupération de l'eau de la « Beijing University of Technology » pour son avis favorable quant à cette demande de stage auprès de la structure qu'il dirige. Pour son encadrement, sa grande disponibilité, ses conseils et sa compréhension qui ont été d'un grand soutien tout au long de ce travail ;

**M. SIE OUATTARA, Responsable du recrutement pour les stages et études**, pour cette opportunité qu'il a offerte, sa confiance, sa compréhension et son aide quant aux activités déroulées dans le cadre de ce stage ;

**Mme LAN SHUANG SHUANG, Chargée des projets et études** à l'institut pour ses directives et ses encouragements dans l'exécution de ce stage ;

**Mme ZHANG XIUTING, Chef de service stage et formation** pour son aide quant à notre insertion au sein de cette structure ;

À tout le personnel du laboratoire de Pékin pour la science de la qualité de l'eau et l'ingénierie de récupération de l'eau ;

À tous mes enseignants qui m'ont assuré une bonne base théorique en particulier une pensée pour le Dr **MAHAMADOU KOÏTA**, enseignant-chercheur à 2iE pour son encadrement. Votre compréhension, vos conseils et encouragements au travail, votre promptitude et surtout votre disponibilité m'ont beaucoup apporté. Très reconnaissant du temps que vous m'avez consacré, vous avez été un modèle pour moi tout au long de mon apprentissage.

Je remercie aussi mes collègues stagiaires et toutes les personnes avec lesquelles j'ai eu le plaisir de collaborer et qui ont pu par la même occasion participer de près ou de loin à l'élaboration de ce projet.



## AVANT-PROPOS

Le Collège d'Architecture et de Génie civil de la « Beijing University of Technology » (BJUT) a été fondé en avril 1988 par la fusion de 3 départements et l'institut de surveillance architecturale et de conception. Aujourd'hui, il existe 4 départements : Génie civil, Ingénierie municipale, Ingénierie du bâtiment et des installations, Ingénierie du transport et un institut de surveillance architecturale et de conception qui est qualifié en tant que consultant en design de classe A en Chine. Il y a aussi 9 instituts de recherche rattachés à ce collège dont la structure où ce stage a été effectué à savoir le laboratoire de Pékin pour la science de la qualité de l'eau et l'ingénierie de récupération de l'eau.

Le laboratoire de Pékin pour la science de la qualité de l'eau et l'ingénierie de récupération de l'eau a été établi en 2001 en prenant en compte plusieurs disciplines dans le domaine de l'hydraulique et plusieurs projets pour la conservation de l'eau. Il est dirigé par le Professeur Zhang Yongxiang. Les personnes y travaillant sont au nombre de 8, dont 2 Professeurs et 6 Professeurs Assistants. L'institut s'occupe principalement du développement rationnel et l'utilisation des ressources en eau, de la protection de l'environnement de l'eau, de la gestion et l'évaluation des projets hydroélectriques, de la conservation de l'eau et la conception pour l'optimisation des projets hydroélectriques.

Récemment avec la pénurie d'eau, la protection régionale de l'environnement de l'eau et d'autres questions, l'institut a entrepris une série de services dans les travaux d'enseignement et de recherche à Beijing. Il est sur la réalisation d'un certain nombre de grands projets de sciences naturelles en mettant l'accent sur le sujet de la recherche verticale et a été récompensé par 2 prix scientifiques et technologiques de niveau provincial et ministériel en près de 5 ans.

L'Institut International de l'Eau et de l'Environnement (2iE) dans un souci de former des Ingénieurs de Conception et des Techniciens supérieurs hautement qualifiés et aptes à relever les challenges, imposent à ces étudiants de niveau master des stages de production en entreprise ou dans un laboratoire de recherche. Ces étudiants qui sont mis à l'épreuve pendant une période d'au moins vingt semaines sur un problème d'actualité dans la structure d'accueil doivent produire un mémoire qui s'inscrit dans leur domaine de formation. C'est dans ce cadre que ce stage a été effectué au sein de cette structure. Il s'est déroulé dans la période du 10 octobre 2016 au 19 mai 2017 sur le thème: « Evaluation de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines du district de Chaoyang, Beijing, Chine».

Le présent rapport rend compte des travaux effectués.



## LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES

2iE : Institut International de l'Eau et de l'Environnement

AHP : Analytic Hierarchy Process

BJUT : Beijing University of Technology

DRASTIC : Méthode dont le sigle est formé ses sept paramètres profondeur de l'eau « Depth of water » (D), Recharge (R), type d'Aquifère (A), type de Sol (S), Topographie (T), Impact de la zone vadose (I), Conductivité (C).

EPA : Environmental Protection Agency

EVARISK : logiciel conçu pour étudier les processus d'atténuation et d'écoulement au niveau des premiers mètres sous la surface du sol.

GOD : Méthode provenant d'un acronyme « Groundwater occurrence (type d'aquifère), Overall aquifer class (caractéristiques de l'aquifère en terme de lithologie et de porosité), « Depth to the water table » (profondeur de la nappe).

GPS : Global Positioning System (assistant de navigation personnel)

PEHD : Polyéthylène Haute Densité

SIG : Systèmes d'Information Géographique



## UNITES

| <b>Abréviation</b>   | <b>Signification</b>         |
|----------------------|------------------------------|
| mm                   | millimètre                   |
| m                    | mètre                        |
| m <sup>3</sup>       | mètre cube                   |
| m/jr                 | mètre par jour               |
| m <sup>3</sup> /jr   | mètre cube par jour          |
| km                   | kilomètre                    |
| km <sup>2</sup>      | kilomètre carré              |
| hbt/ km <sup>2</sup> | Habitant par kilomètre carré |
| °C                   | degré Celsius                |
| %                    | pour cent                    |
| ‰                    | pour mille                   |
| µg/L                 | microgramme par litre        |
| mg/L                 | milligramme par litre        |
| pcs/L                | unités par litre             |
| a/mL                 | quantité par millilitre      |
| Bq/L                 | Becquerel/litre              |



## RÉSUMÉ

Situé à l'est de la ville de Beijing, Chaoyang est le district le plus grand et le plus moderne de cette ville. Aujourd'hui, ses ressources en eaux souterraines qui représentent la principale source d'approvisionnement en eau potable sont menacées en raison de la pollution et de leur surexploitation. En vue de protéger au mieux ces ressources, la présente étude est initiée et vise à caractériser leur degré de vulnérabilité à l'échelle du district. Pour atteindre cet objectif, la méthodologie adoptée a consisté d'abord à identifier sur le terrain les sources de pollution de ces eaux souterraines et à déterminer leur qualité. Ensuite, l'application des méthodes de caractérisation de la vulnérabilité des eaux souterraines DRASTIC et AHP a été effectuée.

Les différentes investigations ont révélé que les industries, les déchets municipaux, les produits pétroliers ou encore les pesticides sont les principales sources de pollution des eaux souterraines. D'une manière générale, l'eau dans le district est en majorité de bonne qualité avec un pourcentage de 62,5% des échantillons analysés. Les zones où l'eau est de mauvaise qualité (30,56%) sont situées dans la zone industrielle et dans les zones de forte agglomération.

Les cartes de vulnérabilité issues de l'application de chacune des méthodes révèlent que la méthode DRASTIC sous-estime le degré de vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution par rapport aux méthodes AHP-DRASTIC, DRASTIC-AHP et AHP-AHP. La classe de vulnérabilité dominante dans le cadre d'étude est celle de la classe « moyenne » avec des pourcentages de surfaces de 71,34% pour la méthode AHP – DRASTIC, 74,16% pour la DRASTIC-AHP et 65,31% pour la méthode AHP-AHP. La méthode AHP - AHP surestime le degré de vulnérabilité des eaux à la pollution par rapport aux méthodes AHP – DRASTIC et DRASTIC-AHP avec des pourcentages de différence d'indice de 77,56% et 57,81%.

Mots clés : DRASTIC, AHP, SIG, eaux souterraines, pollution, vulnérabilité, Chaoyang, Chine



## ABSTRACT

Located in the eastern part of Beijing, Chaoyang is the largest and most modern district of this city. Today, its groundwater resources, which represent the main source of drinking water supply, are threatened by pollution and overexploitation. In order to protect these resources, this study is initiated and aims to characterize their degree of vulnerability at the district level. In order to achieve this objective, the first step of the methodology adopted is to identify the sources of pollution of the groundwater resources of Chaoyang district and determine their quality. In the second step, the application of the DRASTIC and AHP groundwater vulnerability assessment methods was carried out.

These various investigations revealed that industries, municipal waste, petroleum products and pesticides are the main sources of groundwater pollution. Generally, according to the samples analyzed, water in the district is of good quality with a percentage of 62.5%. Areas with poor water quality (30.56%) are located in the industrial zone and in the high agglomeration zones.

The vulnerability maps derived from the application of each method reveal that the DRASTIC method underestimates the degree of vulnerability of groundwater to pollution compared to AHP-DRASTIC, DRASTIC-AHP and AHP-AHP methods. The dominant class of vulnerability in the studied area is the "average" class with 71.34% for the AHP-DRASTIC method, 74.16% for the DRASTIC-AHP and 65.31% for The AHP-AHP method. The AHP - AHP method overestimates the degree of water vulnerability to pollution compared to the AHP - DRASTIC and DRASTIC - AHP methods with percentages of 77.56% and 57.81% respectively.

**Key words:** DRASTIC, AHP, GIS, groundwater, pollution, vulnerability, Chaoyang, China



## 抽象

位于北京东部的朝阳是这个城市规模最大，最现代化的区域。今天，其地下水资源是饮用水供应的主要来源，受到污染和过度开发的威胁。为了保护这些资源，本研究得到启发，旨在表征他们在区级的脆弱程度。为了实现这一目标，所采用的方法的第一步是确定朝阳区地下水资源的污染源，并确定其质量。第二步，开展 DRASTIC 和 AHP 地下水脆弱性评估方法的应用。

这些调查显示，工业，城市垃圾，石油产品和农药是地下水污染的主要来源。一般情况下，按照样本分析，该区水质质量好，占 62.5%。水质差（30.56%）位于工业区和高集聚区。

从每个方法的应用得到的脆弱性图表明，与 AHP-DRASTIC，DRASTIC-AHP 和 AHP-AHP 方法相比，DRASTIC 方法低估了地下水对污染的脆弱性程度。研究区域的主要弱点类别是 AHP-DRASTIC 方法的“平均”等级为 71.34%，DRASTIC-AHP 为 74.16%，AHP-AHP 法为 65.31%。与 AHP-DRASTIC 和 DRASTIC-AHP 方法相比，AHP-AHP 方法高估了水分易感性，分别为 77.56% 和 57.81%。

关键词：DRASTIC，AHP，GIS，地下水，污染，易损性，朝阳，中国



## TABLE DES MATIÈRES

|   |    |
|---|----|
| <b>INTRODUCTION</b> .....   | 1  |
| <b>I. GENERALITES</b> .....   | 3  |
| I.1. Site d'étude.....  | 3  |
| I.1.1 Situation géographique .....  | 3  |
| I.1.2 Principales caractéristiques du district de Chaoyang.....                         | 4  |
| I.1.2.1. Climat.....  | 4  |
| I.1.2.2. Hydrographie.....  | 6  |
| I.1.2.3. Topographie .....  | 7  |
| I.1.2.4. Hydrologie et hydrogéologie.....   | 7  |
| I.1.3 Contexte socio-économique.....  | 9  |
| I.2. Méthodes de caractérisation de la vulnérabilité à la pollution des aquifères.....  | 9  |
| I.2.1 Notion de vulnérabilité.....  | 9  |
| I.2.2 Méthodes de caractérisation de la vulnérabilité des aquifères à la pollution..... | 10 |
| I.2.2.1. Présentation des méthodes de caractérisation .....                             | 10 |
| I.2.2.2. Choix de la méthode de travail.....  | 11 |
| I.3. Conclusion partielle.....  | 12 |
| <b>II. METHODOLOGIE</b> .....   | 13 |
| II.1. Identification et caractérisation des sources de pollution .....                  | 13 |
| II.1.1 Identification des sources potentielles de pollution .....                       | 13 |
| II.1.2 Caractérisation des sources de pollution .....                                   | 14 |
| II.1.2.1. Echantillonnage et analyse des prélèvements .....                             | 14 |
| II.1.2.2. Catégorisation des échantillons d'eau .....                                   | 16 |
| II.1.2.3. Méthode de valeur F .....   | 18 |
| II.2. Caractérisation de la vulnérabilité par les méthodes DRASTIC et AHP .....         | 20 |
| II.2.1 Présentation de la méthode DRASTIC.....  | 20 |
| II.2.1.1. Origines et définition.....   | 20 |
| II.2.1.2. Source des paramètres.....  | 23 |
| II.2.1.3. Conditions d'utilisation de la méthode DRASTIC .....                          | 24 |
| II.2.2 Estimation des paramètres DRASTIC.....   | 24 |
| II.2.2.1. La profondeur de l'eau (D) .....  | 24 |
| II.2.2.2. La recharge nette (R) .....   | 24 |



|             |   |           |
|-------------|---|-----------|
| II.2.2.3.   | Matériaux de l'aquifère ou aquifère média (A).....  | 26        |
| II.2.2.4.   | Type de sol S.....  | 26        |
| II.2.2.5.   | Topographie T.....  | 26        |
| II.2.2.6.   | Impact de la zone vadose I.....   | 27        |
| II.2.2.7.   | La conductivité hydraulique C.....  | 27        |
| II.2.3      | Cartographie de zones de vulnérabilité DRASTIC.....   | 28        |
| II.2.4      | Codification et classement AHP.....   | 29        |
| II.2.5      | Cartographie des zones de vulnérabilité par les méthodes AHP – DRASTIC, DRASTIC – AHP, AHP – AHP..... | 33        |
| II.2.6      | Validation et analyse comparée des cartes de vulnérabilité.....                                       | 34        |
| II.2.6.1.   | Validation des cartes de vulnérabilité.....   | 34        |
| II.2.6.2.   | Analyse comparée des cartes.....  | 34        |
| II.2.7      | Conclusion partielle.....   | 35        |
| <b>III.</b> | <b>Résultats et discussions.....</b>  | <b>36</b> |
| III.1.      | Identification et caractérisation des sources de pollution.....                                       | 36        |
| III.1.1     | Identification des sources potentielles de pollution.....   | 36        |
| III.1.1.1.  | La pollution par infiltration des eaux de surface contaminées.....                                    | 38        |
| III.1.1.2.  | Pollution chimique et pétrolière.....   | 38        |
| III.1.1.3.  | Pollution par les déchets solides municipaux.....   | 39        |
| III.1.1.4.  | Pollution par les pesticides agricoles.....   | 40        |
| III.1.2     | Caractérisation des sources de pollution.....   | 40        |
| III.2.      | Caractérisation de la vulnérabilité par les méthodes DRASTIC et AHP.....                              | 43        |
| III.2.1     | Les paramètres DRASTIC.....   | 43        |
| III.2.1.1.  | La profondeur de l'eau (D).....   | 43        |
| III.2.1.2.  | La recharge nette (R).....  | 44        |
| III.2.1.3.  | Les matériaux de l'aquifère (A).....  | 46        |
| III.2.1.4.  | Le type de sol (S).....   | 47        |
| III.2.1.5.  | La topographie (T).....   | 48        |
| III.2.1.6.  | Impact de la zone vadose (I).....   | 49        |
| III.2.1.7.  | La conductivité hydraulique (C).....  | 51        |
| III.2.2     | Cartographie de zones de vulnérabilité DRASTIC.....   | 52        |
| III.2.3     | Cartographie des zones de vulnérabilité par les méthodes AHP – DRASTIC, DRASTIC – AHP, AHP – AHP..... | 54        |
| III.2.3.1.  | Méthode AHP - DRASTIC.....  | 54        |



|                      |   |           |
|----------------------|---|-----------|
| III.2.3.2.           | Méthode DRASTIC - AHP .....                 | 57        |
| III.2.3.3.           | Méthode AHP - AHP .....                     | 59        |
| III.2.4              | Analyse comparée des méthodes .....         | 62        |
| III.2.4.1.           | Discussions .....                           | 64        |
| <b>IV.</b>           | <b>Conclusions et recommandations</b> ..... | <b>66</b> |
| <b>BIBLIOGRAPHIE</b> | .....                                       | <b>68</b> |
| <b>ANNEXES</b>       | .....                                       | <b>70</b> |



## LISTE DES TABLEAUX

|  |    |
|--|----|
| Tableau 1 : Estimation des précipitations naturelles annuellement et pendant la saison des inondations dans le district de Chaoyang .....          | 5  |
| Tableau 2 : Évaporation potentielle de la surface de l'eau du district de Chaoyang et de la surface terrestre mensuelle .....                      | 6  |
| Tableau 3: Caractéristiques des principales rivières du district de Chaoyang (Source : Bureau des affaires de l'eau de Beijing) .....              | 7  |
| Tableau 4 : Index de classification de la qualité des eaux souterraines (Ministry of Water Resources 1993).....                                    | 17 |
| Tableau 5 : Exemple de classification de résultats d'analyse en un point donné .....   | 18 |
| Tableau 6 : Score d'évaluation individuel $F_i$ .....  | 19 |
| Tableau 7 : Normes d'évaluation de la qualité des eaux souterraines .....  | 19 |
| Tableau 8 : Exemple d'attribution de score individuel $F_i$ .....  | 19 |
| Tableau 9 : Poids et côtes originales de la méthode DRASTIC (Aller et al. 1987) .....  | 22 |
| Tableau 10 : Indice DRASTIC et degré de vulnérabilité (Aller et al, 1987) .....  | 23 |
| Tableau 11: Conductivité hydraulique (m/jr) en fonction des zones (Jing, 2013) .....   | 28 |
| Tableau 12 : Valeurs des notes attribuées lors de l'évaluation de l'importance de deux éléments (El Morjani 2002) .....                            | 30 |
| Tableau 13 : Indicateurs de cohérence aléatoire la .....   | 31 |
| Tableau 14 : Exemple de valeurs de profondeur d'eau en un point donné .....  | 32 |
| Tableau 15 : Exemple d'attribution des côtes en fonction des critères DRASTIC .....  | 32 |
| Tableau 16 : Exemple de matrice de détermination des poids et des côtes .....  | 32 |
| Tableau 17 : Classification des vulnérabilités en fonction des indices obtenus par les méthodes dérivées (Ministry of Water Resources, 1993) ..... | 33 |
| Tableau 18 : Indices et classes de vulnérabilité .....   | 34 |
| Tableau 19 : Endroits où les eaux souterraines sont de mauvaise qualité .....  | 42 |
| Tableau 20 : Côtes attribuées à la recharge nette .....  | 46 |
| Tableau 21 : Côtes attribuées aux matériaux de l'aquifère .....  | 46 |
| Tableau 22 : Côtes attribuées aux matériaux de la zone vadose .....  | 50 |
| Tableau 23: valeurs des côtes attribuées aux classes de conductivité .....   | 51 |
| Tableau 24 : degré de qualité en fonction des classes de vulnérabilité.....  | 54 |
| Tableau 25: Répartition des classes de qualité en fonction des classes de vulnérabilité de la méthode AHP – DRASTIC .....                          | 57 |
| Tableau 26 : Répartition des classes de qualité en fonction des classes de vulnérabilité de la méthode DRASTIC- AHP .....                          | 58 |
| Tableau 27 : Répartition des classes de qualité en fonction des classes de vulnérabilité de la méthode AHP – AHP .....                             | 61 |
| Tableau 28: Tableau récapitulatif des pourcentages de surface par classe et par méthode .....  | 62 |
| Tableau 29 : Pourcentage des surfaces des différences .....  | 63 |
| Tableau 30 : Références des points d'échantillonnage .....   | 77 |
| Tableau 31 : Valeurs de F calculées.....   | 79 |
| Tableau 32 : Détails de calcul méthode DRASTIC.....  | 81 |
| Tableau 33: Côtes des critères du paramètre "D" .....  | 84 |
| Tableau 34 : Côtes des critères du paramètre "R" .....   | 84 |



|  |    |
|--|----|
| Tableau 35: Côtes des critères du paramètre "A" .....                                    | 84 |
| Tableau 36: Côtes des critères du paramètre "S" .....                                    | 85 |
| Tableau 37 : Côtes des critères du paramètre "I" .....                                   | 85 |
| Tableau 38 : Côtes des critères du paramètre "C" .....                                   | 85 |
| Tableau 39 : Poids des paramètres DRASTIC.....   | 86 |
| Tableau 40: Détails de calcul méthode DRASTIC-AHP .....                                  | 87 |
| Tableau 41 : détails de calcul méthode AHP-DRASTIC .....                                 | 89 |
| Tableau 42 : Détails de calcul méthode AHP-AHP.....                                      | 91 |
| Tableau 43 : Tableau récapitulatif des côtes et des poids en fonction des méthodes ..... | 93 |



## LISTE DES FIGURES

|   |    |
|---|----|
| Figure 1 : Localisation du district de Chaoyang.....  | 4  |
| Figure 2 : Pluviométrie à Chaoyang de 1956 à 2012 (Source : station météo de Jiuxianqiao).....                        | 5  |
| Figure 3 : Présentation du matériel de prélèvement des eaux.....  | 15 |
| Figure 4 : Prélèvement d'un échantillon d'eau au canton agricole de Wangsiying .....                                  | 15 |
| Figure 5 : Ajout d'une dose de NaOH dans un échantillon de 100 ml.....  | 15 |
| Figure 6 : Classes de taux d'infiltration dans le district de Chaoyang (Bureau des affaires de l'eau de Beijing)..... | 25 |
| Figure 7 : Zones de conductivité à Chaoyang (Jing, 2013) .....  | 28 |
| Figure 8 : Organigramme de la cartographie de vulnérabilité par la méthode DRASTIC (Simboro Aly, 2015).....           | 29 |
| Figure 9 : Points de prélèvement en fonction de la nature du lieu.....  | 37 |
| Figure 10: Rivière polluée à Chaoyang (Zhang,2014).....   | 38 |
| Figure 11: Eaux usées lors de l'inondation du 31/ 07/06 (Zhang,2014).....   | 38 |
| Figure 12 : Déversement d'eau usée industrielle dans une rivière .....  | 39 |
| Figure 13: Décharge informelle d'ordure .....   | 40 |
| Figure 14 : Présence d'ordures dans une rivière .....   | 40 |
| Figure 15: Qualité des eaux aux points d'échantillonnage selon les normes GB/T14848-93 .....                          | 41 |
| Figure 16 : Profondeur (m) de la nappe au niveau du district de Chaoyang.....   | 44 |
| Figure 17: Répartition des intensités de la recharge nette (mm) dans le district de Chaoyang.....                     | 45 |
| Figure 18 : Matériaux dominants dans les aquifères du district de Chaoyang .....                                      | 47 |
| Figure 19 : Types de sols à Chaoyang.....   | 48 |
| Figure 20: Topographie (%) dans le district de Chaoyang.....  | 49 |
| Figure 21 : Matériaux de la zone vadose dans le district de Chaoyang .....  | 50 |
| Figure 22: Valeurs de la conductivité hydraulique dans le district .....  | 51 |
| Figure 23 : carte de représentation des classes de vulnérabilité DRASTIC .....  | 52 |
| Figure 24 : Comparaison classe de vulnérabilité DRASTIC - degré de qualité de l'eau .....                             | 53 |
| Figure 25: Carte de répartition des classes de vulnérabilité selon la méthode AHP – DRASTIC.....                      | 55 |
| Figure 26 : Répartition des classes de qualité sur le modèle de vulnérabilité AHP - DRASTIC .....                     | 56 |
| Figure 27: Répartition des classes de vulnérabilité obtenues par le modèle DRASTIC – AHP .....                        | 58 |
| Figure 28 : Répartition des classes de qualité sur le modèle de vulnérabilité DRASTIC -AHP .....                      | 59 |
| Figure 29: Répartition des classes de vulnérabilité obtenues par le modèle AHP – AHP .....                            | 60 |
| Figure 30 : Répartition des classes de qualité sur le modèle de vulnérabilité AHP-AHP .....                           | 61 |
| Figure 31 : Profil hydrogéologique n°1 direction Est Ouest .....  | 71 |
| Figure 32 : Profil hydrogéologique n°2 direction Est Ouest .....  | 71 |
| Figure 33 : Profil hydrogéologique n°3 direction Est Ouest .....  | 72 |
| Figure 34 : Profil hydrogéologique n°4 direction Est Ouest .....  | 72 |
| Figure 35 : Profil hydrogéologique n°1 direction Nord Sud .....   | 73 |
| Figure 36 : Profil hydrogéologique n°2 direction Nord Sud .....   | 73 |



## INTRODUCTION

Localisée en Asie de l'est, la République Populaire de Chine avec ses 9,6 million de km<sup>2</sup> est le troisième pays le plus vaste au monde après la Russie et le Canada. Ce pays a connu de très importantes réformes durant ses trois dernières décennies tant sur le plan économique que social. Malheureusement, cette rapide croissance économique et sociale a engendré des conséquences néfastes sur ses ressources en eau. Les gestionnaires de ces ressources doivent faire face à de nombreux défis en raison de leur non uniformité et de leur raréfaction, de l'importante densité de la population, de l'augmentation des besoins en eau domestique et industrielle, des exigences en matière d'autosuffisance alimentaire et d'une importante dégradation de l'environnement.

Ses dernières années le Nord de la Chine manque d'eau particulièrement les grandes villes comme sa capitale Beijing. Les ressources en eau à Beijing ne sont que de 107 m<sup>3</sup> par personne, ce qui est très largement inférieure au seuil de pénurie de 1000 m<sup>3</sup> par personne établi par Falkenmark en 1989 (Zhang, 2014). Le District de Chaoyang localisé dans la ville de Beijing n'est pas épargné par la raréfaction des ressources en eau. Etant donné qu'il s'agit de la zone industrielle la plus importante de la ville de Beijing, ce district bénéficie d'une attention particulière en ce qui concerne le degré de pollution qu'il engendre. La mauvaise gestion et le traitement inadéquat des eaux usées, domestiques comme industrielles, dans ce district dans le passé ont entraîné une grave pollution des eaux de surface qui sont de moins en moins utilisées comme sources d'eau potable. Les eaux souterraines sont aujourd'hui la principale source d'approvisionnement en eau potable.

Les eaux souterraines dans le district de Chaoyang connaissent une surexploitation. Pendant de nombreuses années, le district de Chaoyang a connu un déclin continu des ressources en eau souterraine. En 2013, le niveau moyen de ces eaux a chuté de 14,03 m avec le niveau le plus bas au-dessous du niveau de la mer de 18,76 m (Jing, 2013). En plus de connaître cette baisse, la qualité de ces eaux est en train d'être compromise. Les analyses chimiques effectuées par le bureau des affaires de l'eau de Beijing sur des échantillons d'eau souterraine ont révélées une forte concentration des éléments comme la turbidité, la dureté totale, le fer, le manganèse, le nitrite et l'azote ammoniacal.



Étant donné les coûts importants engendrés par la restauration des aquifères contaminés, il est important, dans le contexte environnemental actuel, que des mesures soient prises afin de protéger les aquifères de la pollution tout en étant conscient que les activités humaines sont une nécessité au sein de la société. Une des approches d'aide à la prévention de la pollution de l'eau souterraine est la connaissance des zones spécialement vulnérables. L'évaluation de la vulnérabilité à la pollution dans le district de Chaoyang a été confiée à notre structure par le bureau des affaires de l'eau de Beijing afin de déterminer ces zones de vulnérabilité à la pollution.

### **Objectifs**

Ce projet vise à protéger les eaux souterraines du district de Chaoyang de toute pollution tout en favorisant une meilleure gestion du district. Pour atteindre cet objectif, il a été préconisé dans cette étude d'effectuer :

- L'identification et la caractérisation des sources de pollution ;
- La caractérisation de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines du district de Chaoyang par l'application de la méthode DRASTIC et de méthodes dérivées ;
- La cartographie des zones vulnérables à la pollution par l'utilisation des SIG.

### **Plan de l'étude**

Le présent rapport est articulé autour de 4 principales parties :

- La première partie abordant les généralités sur le site d'étude et les méthodes de cartographie des zones de vulnérabilité;
- La seconde partie consacrée à la méthodologie utilisée tout au long de l'étude;
- La troisième partie portant sur les résultats obtenus dans cette étude ;
- La dernière partie présente les conclusions de cette étude ainsi que les propositions de mesures de prévention et de contrôle des sources de pollution.



## I. GENERALITES

Dans ce chapitre, il est présenté le site de notre étude à savoir le district de Chaoyang. Différentes informations sont données afin de situer et de connaître les différentes caractéristiques de ce lieu. Une synthèse des moyens et outils disponibles à l'évaluation de la vulnérabilité est également effectuée dans cette section et la justification du choix de la méthode DRASTIC dans le cadre de notre étude y est exposée.

### I.1. Site d'étude

#### I.1.1 Situation géographique

Le district de Chaoyang est le district urbain le plus grand et le plus moderne de Beijing et est considéré comme une fenêtre d'échange international pour cette ville. Avec une superficie de 467,18 km<sup>2</sup>, le district de Chaoyang est situé dans la partie Est de la ville de Beijing entre les longitudes 116 ° 21' - 116 ° 42' Est et latitudes 39 ° 48' - 40 ° 09' Nord (Figure 1).

Sa longueur du Nord au Sud est d'environ 28 km et sa largeur d'Est en Ouest d'environ 17 km. Le district de Chaoyang est divisé en 21 quartiers pour une population totale estimée en 2010 à 3,545 millions d'habitants (Jing, 2013)

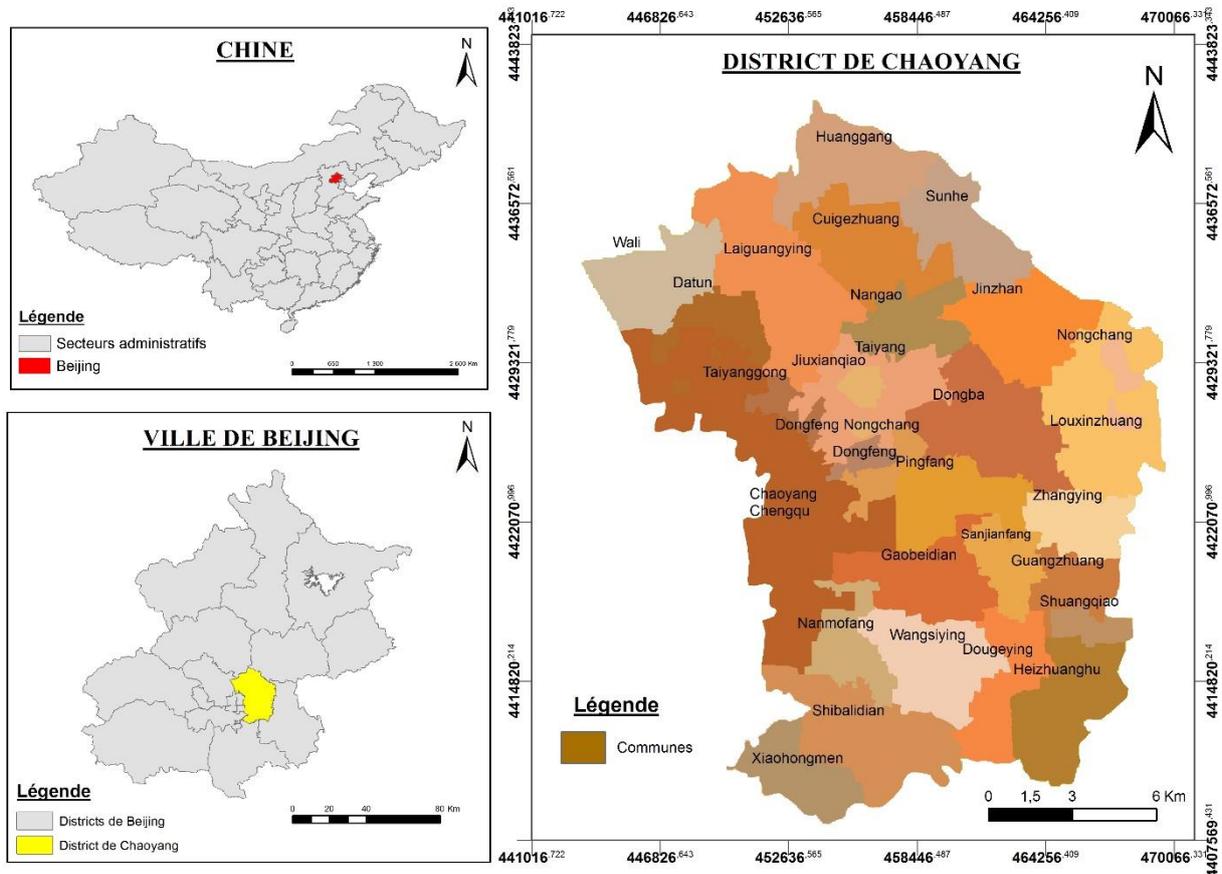


Figure 1 : Localisation du district de Chaoyang

## I.1.2 Principales caractéristiques du district de Chaoyang

### I.1.2.1. Climat

Le district de Chaoyang est soumis au climat continental de type semi – aride. Il est marqué par quatre saisons climatiques : l’automne de Septembre à Novembre, l’hiver de Décembre à Février, le printemps de Mars à Mai et l’été de Juin à Août.

En s’appuyant sur les données de la station météorologique de Jiuxianqiao, la pluviométrie moyenne annuelle sur la période de 1956 à 2012 est de 565,4 mm (Figure 2). L’année la plus pluvieuse est celle de 1959 avec une hauteur de pluie de 1031,1 mm. L’année 1999 est la moins pluvieuse avec une hauteur de pluie de 303,7 mm.

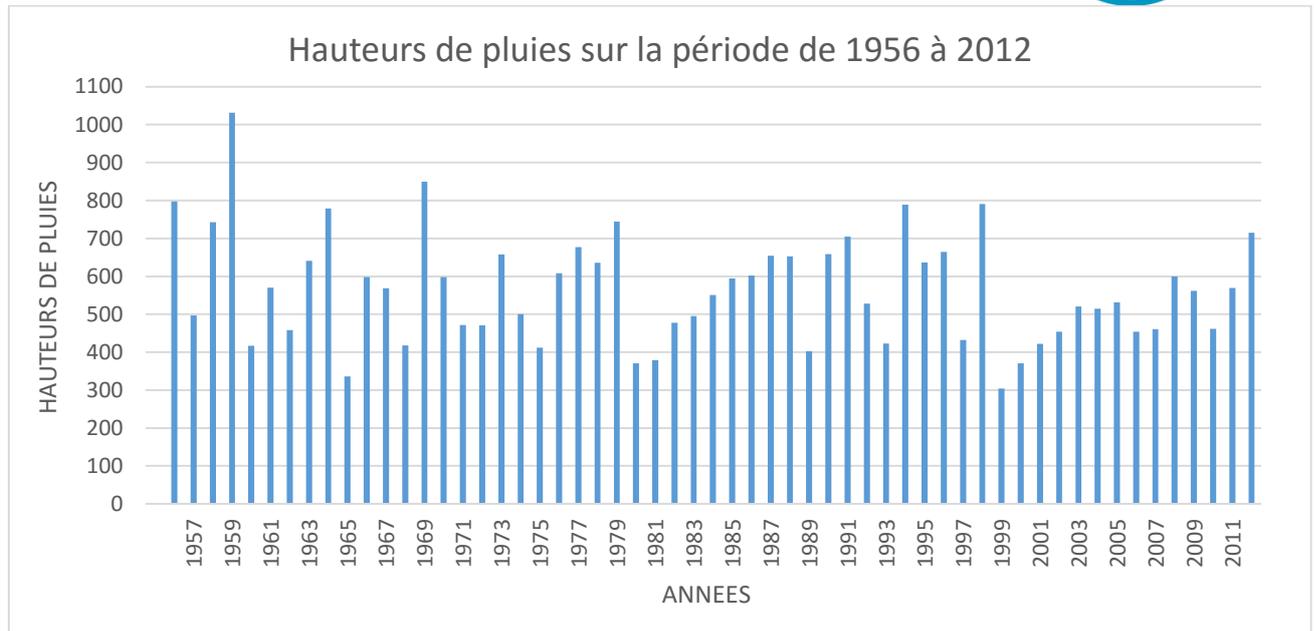


Figure 2 : Pluviométrie à Chaoyang de 1956 à 2012 (Source : station météo de Jiuxianqiao)

Afin de pouvoir refléter essentiellement la relation statistique entre la précipitation et l'évaporation dans toute la région, les données de précipitations de la station météorologique de Jiuxianqiao, située au milieu du district de Chaoyang, ont été utilisées pour calculer la fréquence. Selon l'analyse des données de la pluviométrie de la station de Jiuxianqiao de 1956 - 2012, les caractéristiques des précipitations et de l'évaporation dans le district de Chaoyang ont été déterminées (tableaux 1 et 2).

Tableau 1 : Estimation des précipitations naturelles annuellement et pendant la saison des inondations dans le district de Chaoyang

|                             | Années humides (P = 75%) |                     | Années de précipitations moyennes (P = 50%) |                     | Années sèches (P = 25%) |                     |
|-----------------------------|--------------------------|---------------------|---|---------------------|-------------------------|---------------------|
|                             | Annuel                   | Saison d'inondation | Annuel                                      | Saison d'inondation | Annuel                  | Saison d'inondation |
| Précipitations (mm)         | 727.8                    | 614.5               | 574.9                                       | 489.8               | 451.7                   | 377.3               |
| Précipitations (million m3) | 3.426                    | 2.893               | 2.707                                       | 2.306               | 2.127                   | 1.776               |



Tableau 2 : Évaporation potentielle de la surface de l'eau du district de Chaoyang et de la surface terrestre mensuelle

| Mois             | 1    | 2    | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11   | 12   |
|------------------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|
| Eaux de surface  | 57.4 | 77.2 | 146.7 | 233.1 | 261.9 | 243.3 | 189.7 | 159.8 | 153.4 | 127.0 | 79.0 | 59.6 |
| E <sub>sol</sub> | 16.3 | 21.9 | 41.6  | 66.0  | 74.2  | 68.9  | 53.7  | 45.3  | 43.4  | 36.0  | 22.4 | 16.9 |

L'évaporation est la plus maximale en Mai avec 336,1 mm et minimale en Janvier avec 73,7 mm. La température moyenne est de 12°C avec un maximum de 41,6°C et un minimum de -21,2°C. A Chaoyang, le mois le plus chaud est le mois de Juillet et le mois le plus froid est le mois de Janvier.

#### I.1.2.2. Hydrographie

Le réseau hydrographique du district de Chaoyang est principalement composé de rivières, de lacs et de canaux de drainage.

Les rivières qui le traversent appartiennent au bassin versant du Fleuve Haihe. Les principales rivières au nombre de 9 sont la Wenyu, la Qinghe, la Beixi, la Liangma, la Ba, la Tonghui, la Xiao Taihe, la Liangshui et la Qingyang (Tableau 3). La Wenyu, la Qinghe et la Lianghui sont situées aux limites du district.

En se basant sur le récent recensement du bureau des affaires de l'eau, il existe 78 lacs dans le district principalement situés dans les parcs, les stations balnéaires et les zones résidentielles haut de gamme. Ils couvrent une surface totale d'environ 3,32 km<sup>2</sup> dont les plus étendus sont le lac du parc olympique, le lac du parc de Chaoyang, le lac de Gaobeidian, le lac du parc de Honglingjin et celui de la Shatan ying. Ces lacs jouent un important rôle dans la beauté de la ville, le développement de l'économie à travers le tourisme.

Il y a au total 225 drains pour une longueur totale de 607,4 km dont 9 principaux à savoir Tonghui, Daliushu, Guanyintang, Banbi, Danfangfang, Qingluanggou, Xiaocangou, Beituchenggou et Erdaogou.

Tableau 3: Caractéristiques des principales rivières du district de Chaoyang (Source : Bureau des affaires de l'eau de Beijing)

| Rivière         | Longueur (km) | Surface du bassin versant (km <sup>2</sup> ) | Période de retour des inondations | Profondeur de la rivière à l'aval |
|-----------------|---------------|--|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Wenyu           | 22            | 81,5   | 10                                | 130                               |
| Qinghe          | 15,7          | 48,4   | 20                                | 71,5                              |
| Ba              | 21,6          | 158  | 20                                | 61,4                              |
| Tonghui         | 16,0          | 63,5   | 5                                 | 50                                |
| Liangshui River | 4,2           | 119,4  | 5                                 | 37                                |
| Beixi           | 16,9          | 66   | 20                                | 44,2                              |
| Liangma River   | 9,3           | 14,25  | 20                                | 26                                |
| Xiao Taihe      | 11,9          | 21,83  | 20                                | 29                                |

#### 1.1.2.3. Topographie

Du Nord-Ouest au Sud-Est du district de Chaoyang, l'altitude la plus élevée est de 46 m dans la région de Guanxi Zhuang. L'altitude la plus basse est de 20 m relevée au Sud-Est de la ville aux alentours du pont de Bali. Le relief du district est relativement plat avec une légère inclinaison du Nord-Ouest au Sud-Est. La pente se situe généralement entre 1/1000 et 1/2500 avec une élévation moyenne de 34 m (Jing, 2013).

#### 1.1.2.4. Hydrologie et hydrogéologie

##### Géologie

La structure du sous-sol de la région de Chaoyang est principalement contrôlée au Nord par la structure tectonique du système de Huaxia, à l'Ouest par des dépressions et au Sud Est par l'élévation de Daxinglong. Dans la zone de dépression, on a des couches de terreau, de grès ou de graviers accompagnés d'éruption de basalte à plusieurs étages. L'épaisseur de ces couches peut aller jusqu'à 400 m. En allant du Sud-Ouest au Nord-Est de l'élévation de Daxing, il manque des sédiments tertiaires. A cet endroit, le socle est visible à la surface et très peu profond.



A la fin de la période tertiaire, le paléo-terrain était très inégal et il eût la formation de plusieurs grandes poches. Ces poches sont situées dans les régions de Shuangqiao, Dongliu et Shilipu et Shunyi. Dans la zone de Dongliu au Nord-Est du district, le quaternaire est directement couvert par des strates paléozoïdes et commence à être une zone tectonique sédimentaire. La poche qui s'étend jusqu'à Shunyi est déposée dans les gisements quaternaires. Son épaisseur augmente progressivement d'Ouest en Est en passant de 300 m à 450 m (Wang, 2012). Ces poches et strates présentées sont les endroits où sont localisées les eaux souterraines.

La couche superficielle du sol dans cette zone est constituée d'alluvions datant du Quaternaire. Les couches médiane et supérieure de sol sont composées de sable, de sable gravier mélangé avec du limon. La répartition et l'épaisseur des différentes couches du sol sont contrôlées par des conditions paléogéographiques. L'aquifère le plus profond se situe dans la partie centrale du Pléistocène du Quaternaire. Il est composé principalement de sable et de gravier. On retrouve l'aquifère le moins profond dans la partie supérieure du Pléistocène dont les éléments constituants sont de l'argile brun - jaune, du sable et du gravier.

#### Hydrogéologie

L'analyse de certaines données de forages révèle que les aquifères situés à l'Ouest du district sont constitués de cailloux, de sable et de gravier alors que ceux situés à l'Est sont composés de sable. Les épaisseurs des aquifères varient de 20 à 70 m. Le niveau d'eau le plus élevé apparaît en octobre dans la partie ouest de la Chine alors que dans la partie orientale il est maximal au mois de février suivant. L'écoulement naturel des eaux souterraines se fait du nord-ouest au sud-est avec un gradient hydraulique de 2,3‰ (Wang, 2012).

Selon le bureau des affaires de l'eau du district de Chaoyang, on rencontre deux types d'aquifères dans le district : les aquifères peu profonds et les aquifères confinés multicouches. La recharge des aquifères peu profonds est faite par les précipitations, par infiltration des eaux d'irrigation. Les aquifères confinés sont rechargés grâce au ruissellement latéral dans les zones alluviales des rivières Yongding et Chaobai. Le coefficient de perméabilité dans la zone est généralement compris entre 20 et 100 m/jr. Le débit d'exploitation d'un forage se situe



dans l'intervalle de 500 à 1500 m<sup>3</sup>/jr. La profondeur de l'eau souterraine à Chaoyang varie entre 20 et 30 m.

En annexe 1, il est présenté un profil hydrogéologique dans le district de Chaoyang. Ce Profil a été établi en prenant en compte les données de logs de 15 forages. Il comprend trois profils hydrogéologiques de direction Est - Ouest et trois autres profils de direction Nord - Sud.

### I.1.3 Contexte socio-économique

En se basant sur les données statistiques du district de Chaoyang en 2010, la population y résidant est de 3,545 millions. Le niveau global d'urbanisation est supérieur à 90%. Le produit intérieur brut (PIB) annuel a atteint 266,65 milliards de yuans (34,38 milliards d'euros) démontrant une hausse de 12% par rapport à 2009. Grâce aux enquêtes effectuées auprès de la population résidente, le PIB par habitant dans le district est estimé à 79 313 yuans soit 10 227 euros. Les principales activités pratiquées à Chaoyang sont des activités industrielles et commerciales. Les secteurs générateurs des plus importants bénéfices sont l'industrie textile, l'industrie chimique et « l'industrie du divertissement ».

## I.2. Méthodes de caractérisation de la vulnérabilité à la pollution des aquifères

### I.2.1 Notion de vulnérabilité

La notion de vulnérabilité repose sur l'idée que le milieu physique en relation avec la nappe procure un degré plus ou moins élevé de protection vis-à-vis des pollutions suivant les caractéristiques de ce milieu.

Dans la littérature, on distingue deux types de vulnérabilité : la vulnérabilité intrinsèque et la vulnérabilité spécifique.

- La **vulnérabilité intrinsèque** est selon l'EPA (1993) une fonction des caractéristiques intrinsèques de l'unité hydrogéologique sans considération du comportement et des propriétés de contaminants particuliers. En d'autres termes, il s'agit d'une expression



utilisée pour représenter les caractéristiques du milieu naturel qui déterminent la sensibilité des eaux souterraines à la pollution due aux activités humaines ;

- 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.

La distinction des deux types de vulnérabilité est nécessaire car, d'une façon générale, elles ne se placent pas sur la même échelle d'investigation : la vulnérabilité intrinsèque peut être considérée comme invariante dans le temps alors que la vulnérabilité spécifique (directement liée aux polluants éventuels) est évolutive et ne caractérise qu'un instant précis. Dans cette étude, il sera évalué la vulnérabilité intrinsèque car non seulement elle permet de prendre des mesures sur le long terme mais elle s'avère aussi moins coûteuse et laborieuse que l'évaluation de la vulnérabilité spécifique.

## 1.2.2 Méthodes de caractérisation de la vulnérabilité des aquifères à la pollution

### 1.2.2.1. Présentation des méthodes de caractérisation

L'objectif de l'estimation de la vulnérabilité est de prendre en considération les principales caractéristiques, celles qui représentent le mieux et le plus justement le milieu. Un paramètre permet de mettre en évidence une caractéristique du milieu propre aux processus et propriétés qui s'y réfèrent mais, d'une méthode à l'autre, un paramètre n'est pas toujours évalué de la même manière.

Les types de méthodes de caractérisation de la vulnérabilité sont classés en fonction des procédures. Au nombre de trois (03), ce sont :

- **Les méthodes contextuelles ou cartographiques** qui évaluent la vulnérabilité des eaux souterraines en prenant en compte les contextes hydrogéologiques présents, ceux-ci étant pris comme représentatifs des conditions de vulnérabilité (Vrba et Zaporozec, 1994) (ex : la méthode développée par le département des ressources naturelles du Minnesota).



- **Les méthodes des systèmes paramétriques** utilisent également les caractéristiques du milieu comme paramètres, mais à chacun d'eux est assigné une valeur numérique. L'introduction d'un système de cotation numérique pour chaque classe de paramètres permet d'évaluer les variations de la vulnérabilité (ex : DRASTIC, GOD).

- **Les méthodes analytiques et de modélisation numérique** qui permettent de simuler le transport et l'écoulement de fluides vers et dans l'eau souterraine à l'aide d'équations mathématiques (ex : EVARISK).

#### 1.2.2.2. Choix de la méthode de travail

Le choix de la méthode d'estimation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution a été guidé par divers éléments :

- le but de l'évaluation de la vulnérabilité (étude régionale ou étude de caractérisation) ;
- les conditions d'utilisation de la méthode : il faut que la méthode soit utilisée dans les conditions hydrogéologiques et selon les modalités pour lesquelles elle a été conçue (Aller et al, 1987). Ainsi choisir une méthode d'évaluation de la vulnérabilité implique une connaissance approfondie du milieu de manière à évaluer l'applicabilité des méthodes. C'est pourquoi il est important d'avertir les utilisateurs des limitations de validité des cartes ;
- la quantité d'information disponible et le nombre de paramètres utilisés, afin d'avoir un rapport coût/fiabilité d'estimation le meilleur possible. D'après Vrba et Zaporozec (1994), le choix d'une méthode lors de l'évaluation de la vulnérabilité doit prendre en compte la disponibilité des informations de base ;
- les facteurs limitatifs divers, d'ordre monétaire, effectifs humains ou matériels (accessibilité à des supports informatiques).

Au regard de tous ces critères de décision, la méthode DRASTIC a été choisie. En plus, d'être l'une des méthodes les plus utilisées au monde, elle nous permet de faire cette étude régionale. Elle répond aux conditions hydrogéologiques du milieu de Chaoyang puisqu'elle est appliquée dans le cas des aquifères granulaires, des aquifères rocheux peu ou pas fracturés. Les informations sur les paramètres nécessaires à l'élaboration de cette méthode sont disponibles, faciles à exploiter et à moindre coût.



### I.3. Conclusion partielle

Ce chapitre a permis de situer notre cadre d'étude tout en prenant connaissance des caractéristiques de celui-ci comme le climat, la topographie, la géologie ou encore l'hydrogéologie. Le relief très plat avec des pentes variant de 1/1000 à 1/2500 ne favorise pas le ruissellement d'un éventuel polluant posé à la surface. Les aquifères du district de Chaoyang sont principalement composés de sable et de gravier. Ces matériaux ont des porosités qui peuvent favoriser la migration des polluants dans l'aquifère. De plus, les principales activités pratiquées dans la région sont des activités industrielles qui peuvent constituer une source de pollution pour les eaux souterraines.

Tous ces éléments naturels renforcent notre idée d'effectuer une évaluation de la pollution dans le district. Pour ce faire, il fallait trouver une méthode adéquate pour l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines. En nous appuyant sur la littérature, trois méthodes de caractérisation de la vulnérabilité ont été trouvées. Ce sont les méthodes contextuelles ou cartographiques, les méthodes de systèmes paramétriques, les méthodes analytiques et de modélisation numérique. Il a été aussi décidé d'estimer la vulnérabilité intrinsèque car cela est très avantageux en termes de prise de décision et de coût. Pour estimer la vulnérabilité intrinsèque la méthode DRASTIC (méthode de système paramétrique) a été choisie parce que non seulement elle prend en compte plusieurs paramètres du milieu concerné mais aussi elle peut être réalisée à moindre coût et avec des données facilement disponibles.



## II. METHODOLOGIE

Dans cette partie, il sera expliqué la méthodologie adoptée aux différentes étapes de notre projet. En d'autres termes, il sera expliqué le déroulement des investigations sur terrain ainsi que la caractérisation des sources de pollutions identifiées. L'application des méthodes DRASTIC et AHP sera aussi détaillée. Le processus de cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines du district de Chaoyang et les méthodes de validation y seront exposés.

### II.1. Identification et caractérisation des sources de pollution

#### II.1.1 Identification des sources potentielles de pollution

Afin de faire une identification juste des sources de pollution des eaux souterraines du district de Chaoyang, il a été effectué une recherche documentaire. Cette recherche documentaire a consisté à trouver des cartes, des livres qui ont permis dans un premier temps de connaître l'occupation du sol et dans un second temps de déterminer les sites d'échantillonnage d'eau pour les analyses chimiques.

Le choix des sites d'échantillonnage s'est effectué en prenant en compte plusieurs critères :

- Les sites qui utilisent une certaine quantité d'eau dont les eaux usées peuvent éventuellement être déversées dans la nature (hôpitaux, industries, grandes agglomérations...);
- Les sites où l'irrigation est pratiquée puisque cette pratique de façon générale nécessite l'utilisation de produits chimiques. Il y a aussi les sites où l'eau usée traitée est utilisée pour faire de l'arrosage. (les terrains agricoles, terrains de golf ...);
- Les sites où est réalisé le traitement des eaux usées (station de traitement, station de contrôle);
- Les sites de dépôt et de traitement de déchets solides;
- Les sites où les eaux de surface participent à la recharge des eaux souterraines.

Une fois les sites choisis, une visite de terrain est faite afin de prendre des échantillons d'eau mais aussi pour constater de visu l'état des eaux dans ces lieux.



## II.1.2 Caractérisation des sources de pollution

Le but de la caractérisation des sources de pollution est de déterminer le degré d'influence qu'elles ont sur la qualité des eaux souterraines. En d'autres termes, il s'agit de voir si les activités exercées au niveau des sites identifiés participent à la dégradation de la qualité des eaux souterraines dans le district de Chaoyang. Pour ce faire, le processus suivant a été adopté :

- L'échantillonnage et l'analyse des prélèvements ;
- Une catégorisation en s'appuyant sur les résultats d'analyse et sur les normes nationales de qualité des eaux souterraines GB/T 14848 – 93 ;
- Une estimation de la qualité des eaux souterraines en utilisant la méthode de valeur F qui est un standard national.

### II.1.2.1. Echantillonnage et analyse des prélèvements

#### Echantillonnage

Le prélèvement des échantillons d'eau au niveau des sites choisis s'est effectué en utilisant le matériel suivant (Figure 3) :

- Des GPS ;
- Des étiquettes ;
- Du ruban adhésif ;
- Des gants ;
- Des pipettes ;
- Des sacs en plastiques stérilisés ;
- Une glacière avec de la glace ;
- 2 bouteilles en verre de 1 L ;
- 1 bouteille de 100 ml en PEHD;
- 3 bouteilles de 250 ml en PEHD ;
- Un flacon de NaOH.



Figure 3 : Présentation du matériel de prélèvement des eaux

Les bouteilles ainsi que les bouchons sont rincés au moins 3 fois avec l'eau à prélever avant que les bouteilles ne soient remplies. Elles sont ensuite étiquetées pour faciliter leur traçabilité. Dans certaines bouteilles, il est ajouté une ou deux billes de NaOH afin de conserver un milieu basique favorable à l'analyse de certains éléments chimiques. Le même principe de prélèvement est appliqué pour les sacs stérilisés (Figure 4 et 5).



Figure 4 : Prélèvement d'un échantillon d'eau au canton agricole de Wangsiying



Figure 5 : Ajout d'une dose de NaOH dans un échantillon de 100 ml



## Analyse des échantillons

Les échantillons d'eau ont été analysés par un laboratoire agréé par le bureau des affaires de l'eau du district de Beijing le Center Testing International (CTI).

### II.1.2.2. Catégorisation des échantillons d'eau

Les eaux souterraines en tant que source d'approvisionnement en eau doivent satisfaire aux normes nationales de qualité des eaux souterraines GB / T 14848-93 ou aux dispositions du ministère de la construction intitulées "normes de qualité de l'eau potable". Les normes GB / T 14848-93 permettent de classer la qualité de l'eau en cinq catégories (Tableau 4). Cette classification prend en compte les normes de protection de la santé humaine. De plus, elle permet d'avoir une idée du degré de protection que nécessite une eau par rapport à un élément chimique donné. Cette classification se réfère aux exigences les plus élevées en matière d'eau potable domestique, de qualité de l'eau industrielle et agricole (Ministry of Water Resources, 1993).

Les cinq classes de qualité de l'eau se définissent comme suit :

- La classe I indique que la concentration des éléments chimiques présents dans l'eau est très faible, difficile à estimer. Elle permet de dire que l'eau peut être utilisée pour n'importe quelle activité ;
- La classe II indique que cette concentration des éléments chimiques est faible mais l'eau reste utilisable pour toute sorte d'activité ;
- La classe III indique qu'il faut veiller à ce que cette eau ne soit pas nuisible à la santé humaine. Elle nécessite un traitement préalable avant d'être consommable et est applicable à l'agriculture ;
- La classe IV indique que cette eau est principalement destinée aux activités agricoles et industrielles au vu de ses propriétés. Mais avec un traitement approprié, elle peut être utilisée comme une eau potable ;
- La classe V indique une eau à ne pas boire.

Tableau 4 : Index de classification de la qualité des eaux souterraines (Ministry of Water Resources 1993)

| Numéro de série | Catégorie / valeur / élément standard              | Classe I       | Classe II | Classe III | Classe IV        | Classe V |
|-----------------|--|----------------|-----------|------------|------------------|----------|
| 1               | Couleur (degrés)                                   | ≤5             | ≤5        | ≤15        | ≤25              | >25      |
| 2               | Odeur et goût                                      | N              | N         | N          | N                | O        |
| 3               | Turbidité (degrés)                                 | ≤3             | ≤3        | ≤3         | ≤10              | >10      |
| 4               | Visible à l'œil nu                                 | N <sup>1</sup> | N         | N          | N                | O        |
| 5               | Ph   | 6.5~8.5        | 6.5~8.5   | 6.5~8.5    | 5.5~6.5<br>8.5~9 | <5.5, >9 |
| 6               | Dureté totale (en CaCO <sub>3</sub> ) (mg / L)     | ≤150           | ≤300      | ≤450       | ≤550             | >550     |
| 7               | Solubilité totale des solides (mg / L)             | ≤300           | ≤500      | ≤1000      | ≤2000            | >2000    |
| 8               | Sulfate (mg / L)                                   | ≤50            | ≤150      | ≤250       | ≤350             | >350     |
| 9               | Chlorure (mg / L)                                  | ≤50            | ≤150      | ≤250       | ≤350             | >350     |
| 10              | Fer (Fe) (mg / L)                                  | ≤0.1           | ≤0.2      | ≤0.3       | ≤1.5             | >1.5     |
| 11              | Mn (Mn) (mg / L)                                   | ≤0.05          | ≤0.05     | ≤0.1       | ≤1.0             | >1.0     |
| 12              | Cuivre (Cu) (mg / L)                               | ≤0.01          | ≤0.05     | ≤1.0       | ≤1.5             | >1.5     |
| 13              | Zinc (Zn) (mg / L)                                 | ≤0.05          | ≤0.5      | ≤1.0       | ≤5.0             | >5.0     |
| 14              | Molybdène (Mo) (mg / L)                            | ≤0.001         | ≤0.01     | ≤0.1       | ≤0.5             | >0.5     |
| 15              | Cobalt (Co) (mg / L)                               | ≤0.005         | ≤0.05     | ≤0.05      | ≤1.0             | >1.0     |
| 16              | Phénols volatils (dans le phénol) (mg / L)         | ≤0.001         | ≤0.001    | ≤0.002     | ≤0.01            | >0.01    |
| 17              | Détergent synthétique anionique (mg / L)           | N              | ≤0.1      | ≤0.3       | ≤0.3             | >0.3     |
| 18              | Indice de permanganate (mg / L)                    | ≤1.0           | ≤2.0      | ≤3.0       | ≤10              | >10      |
| 19              | Nitrate (en N) (mg / L)                            | ≤2.0           | ≤5.0      | ≤20        | ≤30              | >30      |
| 20              | Nitrite (en N) (mg / L)                            | ≤0.001         | ≤0.01     | ≤0.02      | ≤0.1             | >0.1     |
| 21              | Ammoniac (NH <sub>4</sub> ) (mg / L)               | ≤0.02          | ≤0.02     | ≤0.2       | ≤0.5             | >0.5     |
| 22              | Fluorure (mg / L)                                  | ≤1.0           | ≤1.0      | ≤1.0       | ≤2.0             | >2.0     |
| 23              | Iodure (mg / L)                                    | ≤0.1           | ≤0.1      | ≤0.2       | ≤1.0             | >1.0     |
| 24              | Cyanure (mg / L)                                   | ≤0.001         | ≤0.01     | ≤0.05      | ≤0.1             | >0.1     |
| 25              | Mercure (Hg) (mg / L)                              | ≤0.00005       | ≤0.0005   | ≤0.001     | ≤0.001           | >0.001   |
| 26              | As (As) (mg / L)                                   | ≤0.005         | ≤0.01     | ≤0.05      | ≤0.05            | >0.05    |
| 27              | Se (mg / L)  | ≤0.01          | ≤0.01     | ≤0.01      | ≤0.1             | >0.1     |
| 28              | Cadmium (Cd) (mg / L)                              | ≤0.0001        | ≤0.001    | ≤0.01      | ≤0.01            | >0.01    |
| 29              | Chromium (hexavalent) (Cr <sup>6+</sup> ) (mg / L) | ≤0.005         | ≤0.01     | ≤0.05      | ≤0.1             | >0.1     |
| 30              | Plomb (Pb) (mg / L)                                | ≤0.005         | ≤0.01     | ≤0.05      | ≤0.1             | >0.1     |
| 31              | Béryllium (Be) (mg / L)                            | ≤0.00002       | ≤0.0001   | ≤0.0002    | ≤0.001           | >0.001   |
| 32              | Baryum (Ba) (mg / L)                               | ≤0.01          | ≤0.1      | ≤1.0       | ≤4.0             | >4.0     |
| 33              | Nickel (Ni) (mg / L)                               | ≤0.005         | ≤0.05     | ≤0.05      | ≤0.1             | >0.1     |
| 34              | Gouttelettes (µg / L)                              | N              | ≤0.005    | ≤1.0       | ≤1.0             | >1.0     |
| 35              | BHC (µg / L)                                       | ≤0.005         | ≤0.05     | ≤5.0       | ≤5.0             | >5.0     |
| 36              | Coliformes totaux (pcs / L)                        | ≤3.0           | ≤3.0      | ≤3.0       | ≤100             | >100     |
| 37              | Le nombre total de bactéries (a / mL)              | ≤100           | ≤100      | ≤100       | ≤1000            | >1000    |
| 38              | Radioactivité alpha totale (Bq / L)                | ≤0.1           | ≤0.1      | ≤0.1       | >0.1             | >0.1     |
| 39              | Radioactivité bêta totale (Bq / L)                 | ≤0.1           | ≤1.0      | ≤1.0       | >1.0             | >1.0     |

<sup>1</sup> N : Ne doit pas être détecté, non présence ; O : Présence

En se basant sur les résultats d'analyse au niveau de chaque site donné, une classification est effectuée en fonction des concentrations des éléments chimiques constituants de l'eau analysée. Par exemple, on a des résultats d'analyse chimique d'une eau en un point donné. A l'aide du tableau 4, chaque élément chimique détecté est classé en fonction de sa concentration. Dans chaque cas, on essaie de se mettre dans le cas le plus défavorable pour se mettre en sécurité. En d'autres termes pour une turbidité de valeur 1, la classe III est considérée (tableau 5).

Tableau 5 : Exemple de classification de résultats d'analyse en un point donné

| Numéro de série | Catégorie / valeur / élément standard          | Valeur | Classe |
|-----------------|--|--------|--------|
| 1               | Couleur  | 3      | II     |
| 2               | Odeur et goût                                  | N      | II     |
| 3               | Turbidité                                      | 6      | IV     |
| 4               | Visible à l'œil nu                             | N      | IV     |
| 5               | Ph   | 7      | III    |
| 6               | Dureté totale (en CaCO <sub>3</sub> ) (mg / L) | 125    | I      |
| 7               | Solubilité totale des solides (mg / L)         | 200    | I      |
| 8               | Sulfate (mg / L)                               | 180    | III    |

Ce processus est celui appliqué à chaque élément de chaque point de notre zone d'investigation.

#### II.1.2.3. Méthode de valeur F

Le standard de qualité des eaux souterraines de la Chine GB / T14848-93 fournit la classification de la qualité des eaux souterraines, des indicateurs de classification de la qualité, des méthodes de suivi et d'évaluation de la qualité (Ministry of Water Resources, 1993).

La méthode de valeur F a été établie comme un standard chinois dans l'évaluation de la qualité des eaux souterraines (Jing, 2013). Elle est utilisée dans pratiquement toutes les études et les contrôles de la qualité de l'eau.

La catégorisation a permis d'attribuer une classe à chaque élément chimique d'un point d'échantillonnage donné. Dans l'application de la méthode de valeur F, il est déterminé un score d'évaluation individuel  $F_i$  fonction de la classe attribuée à chaque élément chimique. Les valeurs des scores individuels en fonction de la catégorie sont données dans le tableau 6.

Tableau 6 : Score d'évaluation individuel  $F_i$

| Catégorie | I | II | III | IV | V  |
|-----------|---|----|-----|----|----|
| $F_i$     | 0 | 1  | 3   | 6  | 10 |

Puis le score d'évaluation complète  $F$  est calculé en utilisant les formules suivantes (Equations 1 et 2):

$$\bar{F} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_i \quad (\text{Eq. 1})$$

$$F = \sqrt{\frac{\bar{F}^2 + F_{\max}^2}{2}} \quad (\text{Eq. 2})$$

Avec  $\bar{F}$  la moyenne des valeurs du score des composantes individuelles  $F_i$  ;

$F_i$  le score de l'évaluation de la  $i^{\text{ème}}$  composante ;

$F_{\max}$  la valeur maximale de l'évaluation des composantes individuelles  $F_i$  ;

$n$  le nombre d'éléments.

La dernière étape est l'évaluation de qualité des eaux souterraines en utilisant le tableau 7.

Tableau 7 : Normes d'évaluation de la qualité des eaux souterraines

| Niveau | Excellent | Bon         | Assez bon    | Mauvais      | Très mauvais |
|--------|-----------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| F      | < 0.8     | 0.8 - < 2.5 | 2.5 - < 4.25 | 4.25 - < 7.2 | > 7.2        |

En appliquant la méthode de valeur  $F$  à l'exemple de la section précédente, on a ce qui suit :

Tableau 8 : Exemple d'attribution de score individuel  $F_i$

| Numéro de série | Catégorie / valeur / élément standard          | Valeur | Classe | Score d'évaluation individuel $F_i$ |
|-----------------|--|--------|--------|-------------------------------------|
| 1               | Couleur (degrés)                               | 3      | II     | 1                                   |
| 2               | Odeur et goût                                  | N      | II     | 1                                   |
| 3               | Turbidité (degrés)                             | 6      | IV     | 6                                   |
| 4               | Visible à l'œil nu                             | N      | IV     | 6                                   |
| 5               | Ph   | 7      | III    | 3                                   |
| 6               | Dureté totale (en CaCO <sub>3</sub> ) (mg / L) | 125    | I      | 0                                   |
| 7               | Solubilité totale des solides (mg / L)         | 200    | I      | 0                                   |
| 8               | Sulfate (mg / L)                               | 180    | III    | 3                                   |



La moyenne des  $F_i$  est ensuite calculé en utilisant l'équation 1

$$AN : \bar{F} = \frac{1+1+6+6+3+0+0+3}{8} = 2,5 \text{ or le } F_{\max} = 6$$

Donc le score d'évaluation complète  $F$  en appliquant l'équation 2 est :

$$AN : F = \sqrt{\frac{2,5^2 + 6^2}{2}} = 4,6$$

Les eaux souterraines au niveau du point étudié sont de mauvaise qualité puisque le score d'évaluation complète  $F$  est compris en 4,25 et 7,2 (tableau 7).

## II.2. Caractérisation de la vulnérabilité par les méthodes DRASTIC et AHP

### II.2.1 Présentation de la méthode DRASTIC

#### II.2.1.1. Origines et définition

La méthode DRASTIC est une méthode de détermination de la vulnérabilité d'une eau souterraine face à la pollution (Aller et al. 1987).

Conçue dans les années 80 aux Etats –Unis par la National Water - Well Association suite à une demande de l'Environment Protection Authority (EPA), elle permet d'évaluer et de cartographier la vulnérabilité des eaux souterraines indépendamment du type de polluant. De plus, la grande partie des facteurs hydrogéologiques qui influencent l'écoulement des eaux souterraines est prise en compte (Jourda et al. 2007). La méthode DRASTIC est basée sur sept paramètres : la profondeur de l'eau (D), la recharge nette (R), les matériaux constitutifs de l'aquifère (A), le type de sol (S), la topographie (T), l'impact de la zone vadose (I) et la conductivité hydraulique (C). Chaque première lettre d'un paramètre constituant le nom de la méthode (Murat 2000).

L'importance relative de chaque paramètre est évaluée par un poids fixe, variant entre une valeur de 1 pour les facteurs les moins significatifs et une valeur de 5 pour les valeurs les plus significatives. A chaque paramètre est attribué une côte variant de 1 à 10 en fonction des



caractéristiques du milieu étudié. Les côtes les plus faibles indiquent les conditions de faible vulnérabilité alors que les côtes les plus fortes quant à elles indiquent une augmentation du degré de vulnérabilité.

L'évaluation de la vulnérabilité par la méthode DRASTIC s'effectue par le calcul de l'Indice DRASTIC selon l'équation suivant (Equation 3) :

$$ID = (D_c D_p) + (R_c R_p) + (A_c A_p) + (S_c S_p) + (T_c T_p) + (I_c I_p) + (C_c C_p) \quad \text{(Eq.3)}$$

Où D, R, A, S, T, I, C sont les paramètres cités plus haut,

c la côte accordée à chaque paramètre ;

p le poids ou facteur de pondération de chaque paramètre.

Le tableau 9 présente les poids et côtes préconisés pour l'évolution des sept paramètres :

Tableau 9 : Poids et côtes originales de la méthode DRASTIC (Aller et al. 1987)

| Profondeur de l'eau (m) |      | Recharge (mm)   |      | Matériaux de l'aquifère             |      | Type de sol            |      | Topographie (pente %) |      | Impact de la zone vadose            |      | Conductivité (m/jr) |      |
|-------------------------|------|-----------------|------|-------------------------------------|------|------------------------|------|-----------------------|------|-------------------------------------|------|---------------------|------|
| Classe                  | Côte | Classe          | Côte | Classe                              | Côte | Classe                 | Côte | Classe                | Côte | Classe                              | Côte | Classe              | Côte |
| (0 - 1.5)               | 10   | (0 - 50.8)      | 1    | Schiste massif                      | 2    | Mince ou absent        | 10   | (0 - 2)               | 10   | Aquifère confiné                    | 1    | (0.04 - 4.1)        | 1    |
| (1.5 - 4.6)             | 9    | (50.8 - 101.6)  | 3    | ignées/métamorphiques               | 3    | Gravier                | 10   | (2 - 6)               | 9    | limon/argile                        | 3    | (4.1 - 12.3)        | 2    |
| (4.6 - 9.1)             | 7    | (101.6 - 177.8) | 6    | Métamorphique igneux                | 4    | Sable                  | 9    | (6 - 12)              | 5    | Shale                               | 3    | (12.3 - 28.7)       | 4    |
| (9.1 - 15.2)            | 5    | (177.8 - 254)   | 8    | séquence de grès, calcaire et shale | 5    | Tourbe                 | 8    | (12 - 18)             | 3    | Sable, gravier avec limon et argile | 6    | (28.7 - 41)         | 6    |
| (15.2 - 22.8)           | 3    | (> 254)         | 9    | lits de grès calcaire               | 6    | Argile rétractable     | 7    | (> 18)                | 1    | Calcaire                            | 6    | (41 - 82)           | 8    |
| (22.8 - 30.4)           | 2    | Pondération 4   |      | Grès ou calcaire massif             | 6    | loam sableux           | 6    | Pondération 1         |      | Grès                                | 6    | (> 82)              | 10   |
| (> 30.4)                | 1    | Pondération 5   |      | Sable et gravier                    | 8    | Loam                   | 5    | Pondération 3         |      | sable et gravier                    | 8    | Pondération 3       |      |
|                         |      |                 |      | Basalte                             | 9    | loam limoneux          | 4    |                       |      | basalte                             | 9    |                     |      |
|                         |      |                 |      | Calcaire karstique                  | 10   | loam argileux          | 3    |                       |      | Karst calcaire                      | 10   |                     |      |
|                         |      |                 |      | Pondération 3                       |      | Boue                   | 2    |                       |      | Pondération 5                       |      |                     |      |
|                         |      |                 |      |                                     |      | Argile non rétractable | 1    |                       |      |                                     |      |                     |      |
|                         |      |                 |      | Pondération 2                       |      |                        |      |                       |      |                                     |      |                     |      |



L'indice peut être converti en pourcentage en utilisant la formule suivante (Equation 4) :

$$\text{Indice en \%} = \frac{I_D - I_{Dmin}}{I_{Dmax} - I_{Dmin}} \times 100 \quad (\text{Eq.4})$$

Or ce pourcentage peut prendre la valeur maximale de 100 à  $I_D = 226$  et une valeur minimale de 0 à  $I_D = 23$  donc l'équation 4 devient :

$$\text{Indice en \%} = \frac{I_D - 23}{203} \times 100 \quad (\text{Eq.5})$$

Le potentiel de pollution augmente dans le même sens que l'indice c'est - à - dire que plus l'indice est grand plus le risque de pollution des eaux souterraines est élevé (tableau 10).

Tableau 10 : Indice DRASTIC et degré de vulnérabilité (Aller et al, 1987)

| Indice de vulnérabilité ( $I_D$ ) | Degré de vulnérabilité |
|-----------------------------------|------------------------|
| 23 – 84 (0 – 30%)                 | Très faible            |
| 85 – 114 (31 – 45%)               | Faible                 |
| 115 – 145 (46 – 60%)              | Moyenne                |
| 146 – 175 (60 – 75%)              | Elevée                 |
| 176 – 226 (76 – 100%)             | Très élevée            |

#### II.2.1.2. Source des paramètres

La plupart des données récoltées pour les différents paramètres a été fournie par le bureau des affaires de l'eau de Beijing . Les données topographiques et les cartes hydrogéologiques sont issues de l'institut des ressources et d'ingénierie.



### II.2.1.3. Conditions d'utilisation de la méthode DRASTIC

Les conditions d'utilisation de la méthode DRASTIC sont les suivantes :

- Le contaminant est introduit à la surface du sol ;
- Le contaminant arrive aux eaux souterraines par infiltration ;
- Le contaminant a la mobilité de l'eau ;
- La zone à évaluer est d'au moins 0,4 km<sup>2</sup> ;
- Le contaminant ne se dégrade pas.

### II.2.2 Estimation des paramètres DRASTIC

#### II.2.2.1. La profondeur de l'eau (D)

La profondeur de l'eau (D) est un paramètre important qui permet de qualifier la capacité de l'aquifère à être affecté par l'infiltration d'un polluant. Ce paramètre détermine l'épaisseur des matériaux à travers lesquels un contaminant peut circuler avant d'atteindre la nappe (Chandoul et al. 2008). De façon générale, plus la profondeur d'eau est grande, plus le polluant met du temps pour atteindre la nappe. Pour la détermination de ce paramètre, il a été utilisé les données de suivi piézométrique fournies par le bureau des affaires de l'eau de Beijing en considérant le niveau statique des eaux.

#### II.2.2.2. La recharge nette (R)

La recharge nette définit la quantité de l'eau par unité de surface qui s'infiltré et atteint la zone saturée. Cette eau permet de transporter le polluant de la surface du sol vers la zone saturée en traversant la zone vadose. Elle dépend du climat (précipitations et ETP), mais également de la topographie et de la nature des formations. Les données sur les taux de recharge nette et leur répartition partielle sont fournis par la figure 6. De plus, les données sur la pluviométrie moyenne annuelle dans le district de Chaoyang sont disponibles. La recharge nette est calculée selon l'équation 6 :

$$\text{Recharge nette} = \text{pluviométrie (mm)} * \text{taux d'infiltration nette} \quad (\text{Eq.6})$$

(Eq.6)

Etant donné qu'il s'agit d'intervalles de taux d'infiltration, la valeur intermédiaire a été considérée pour l'estimation de la recharge nette.

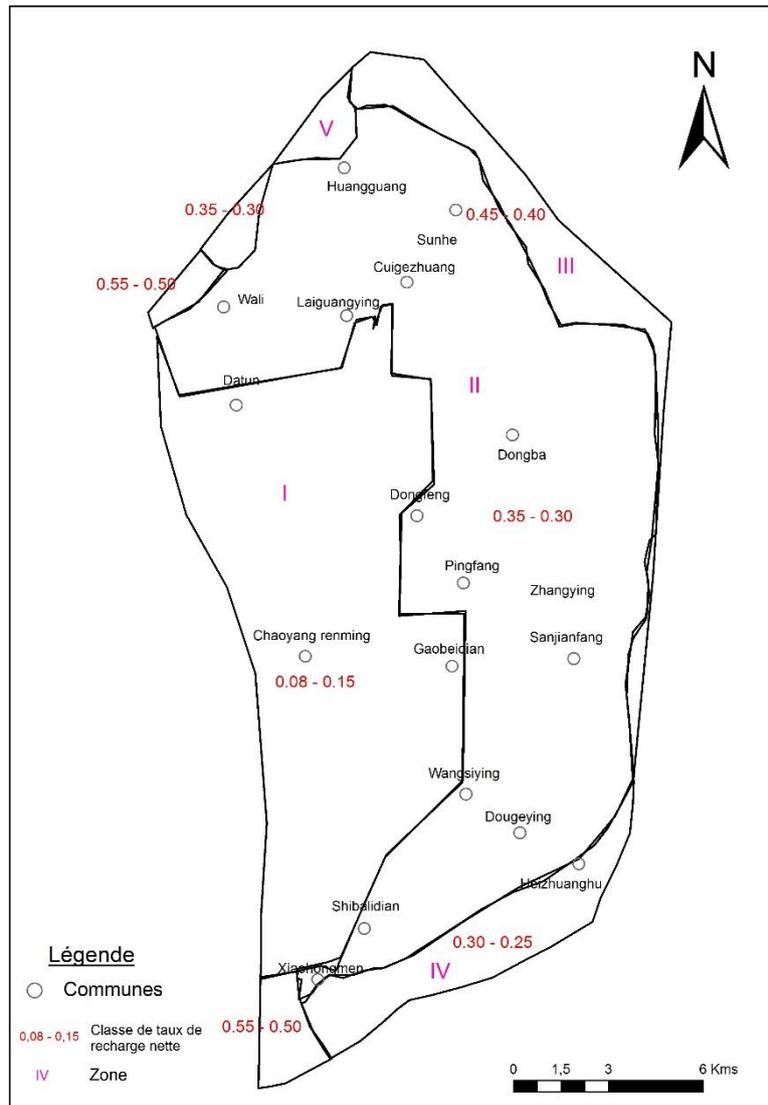


Figure 6 : Classes de taux d'infiltration dans le district de Chaoyang (Bureau des affaires de l'eau de Beijing)



#### II.2.2.3. Matériaux de l'aquifère ou aquifère média (A)

Le paramètre milieu aquifère désigne la lithologie de l'aquifère et il intervient dans le piégeage des polluants échappés au pouvoir d'absorption du sol. Il dépend de la granulométrie de l'aquifère. Plus la granulométrie est faible, plus le piégeage du polluant est important.

Son identification est basée sur les données collectées sur les logs et les coupes lithologiques de forages, puits et piézomètres réalisés dans la zone d'étude (Annexe 2). Les couches les plus dominantes sont considérées.

#### II.2.2.4. Type de sol S

La nature du sol a un impact considérable sur la contamination des nappes phréatiques par les polluants provenant de la surface. Elle peut réduire, retarder ou accélérer le processus de propagation de polluant vers l'aquifère. Plus le sol est riche en argile, plus l'absorption des polluants est importante, et plus la protection des eaux souterraines est grande. Il est déterminé en considérant les 0,5 m des logs de forages utilisés dans ce projet.

#### II.2.2.5. Topographie T

Le paramètre topographie est représenté dans la méthode DRASTIC par les valeurs de la pente en pourcentage. Ce paramètre traduit l'aptitude au ruissellement et à l'infiltration des eaux superficielles vers la nappe et reflète donc la capacité de ces eaux à introduire des agents polluants vers celle-ci. En effet, plus la pente des terrains est grande, plus le ruissellement des eaux est important et par conséquent la contamination des eaux souterraines est faible. En revanche, une zone à faible pente a une tendance à retenir l'eau pendant une longue période, cela favorise l'infiltration des contaminants. Grâce aux courbes de niveau qui sont disponibles, le modèle numérique de terrain est généré et les pentes sont obtenues par interpolation dans le logiciel ARCGIS.



#### II.2.2.6. Impact de la zone vadose I

La zone vadose est une zone non saturée située entre la couche de sol et la nappe phréatique. La nature de cette zone constitue un paramètre important dans l'estimation de la vulnérabilité, car elle influe sur la vitesse de propagation des polluants vers l'aquifère. A cet endroit, la quantité d'eau gravitaire est temporaire, en transit. Son impact est déterminé à partir de la lithologie des terrains qui la constituent.

Le processus de calcul et de cartographie du thème « I » est le même que celui de la zone saturée (A). Il est obtenu par interpolation et corrélation des données des logs forages. Les données des niveaux statiques ont été prises pendant la période des hautes eaux donc il a été considéré les couches situées entre 0,5 m et ces niveaux.

#### II.2.2.7. La conductivité hydraulique C

La conductivité hydraulique de la couche aquifère nous renseigne sur la vitesse de migration des polluants et leur dispersion dans la nappe du point d'injection, à la surface, jusqu'à la zone saturée et, par conséquent, leurs concentrations dans la nappe aquifère (Chandoul et al. 2008). Plus la conductivité est grande, plus le transfert des polluants est rapide à travers la zone non saturée.

Les valeurs des conductivités hydrauliques utilisées pour calculer les degrés de vulnérabilité dans notre zone d'étude sont issues des travaux de thèse de Jing (2013). Dans ses travaux, les valeurs de conductivités en fonction de six zones dans le district ont été données (Figure 7 et Tableau 11).

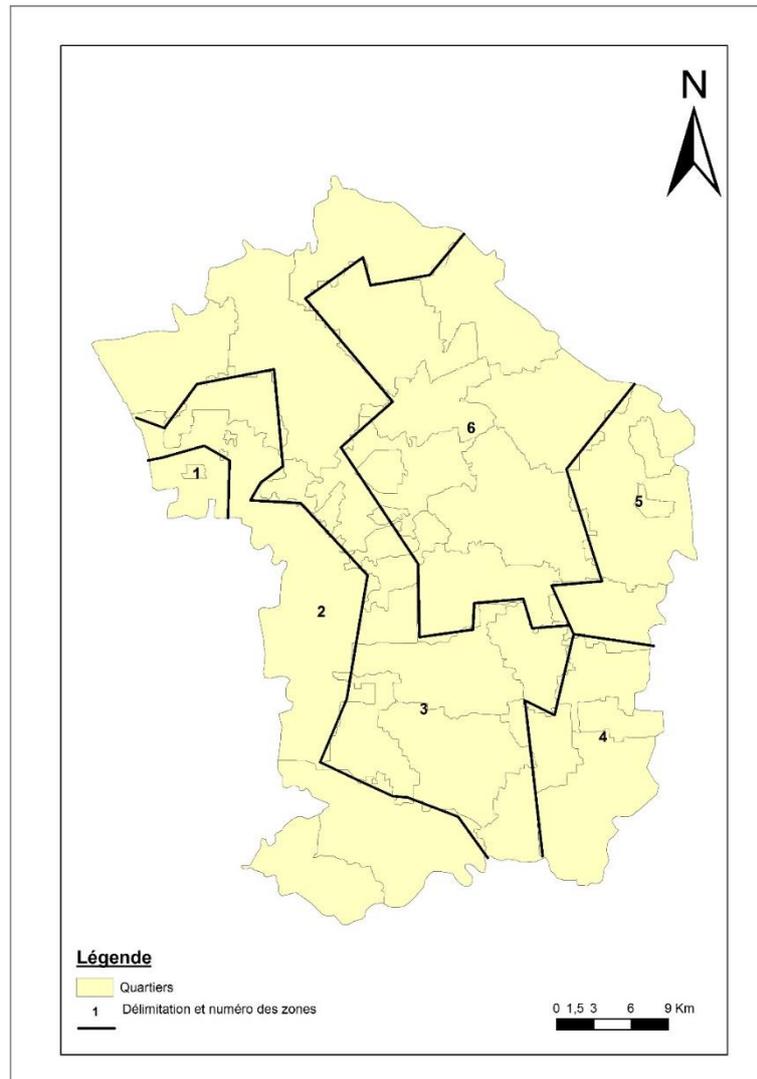


Figure 7 : Zones de conductivité à Chaoyang (Jing, 2013)

Tableau 11: Conductivité hydraulique (m/jr) en fonction des zones (Jing, 2013)

| Numéro de zone | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  |
|----------------|----|----|----|----|----|----|
| K (m/jr)       | 50 | 31 | 20 | 33 | 33 | 14 |

### II.2.3 Cartographie de zones de vulnérabilité DRASTIC

Après avoir recueilli les informations sur les paramètres DRASTIC, les côtes relatives aux critères de ces paramètres sont assignées. Puis le calcul des indices de vulnérabilité DRASTIC selon l'Eq.3 est effectué. La carte des indices de vulnérabilité DRASTIC est réalisée dans ARCGIS en prenant en compte ces valeurs. Les indices sont classés en fonction du degré de

vulnérabilité et il est finalement obtenu la carte de vulnérabilité DRASTIC. Le processus est résumé au niveau de la figure 8.

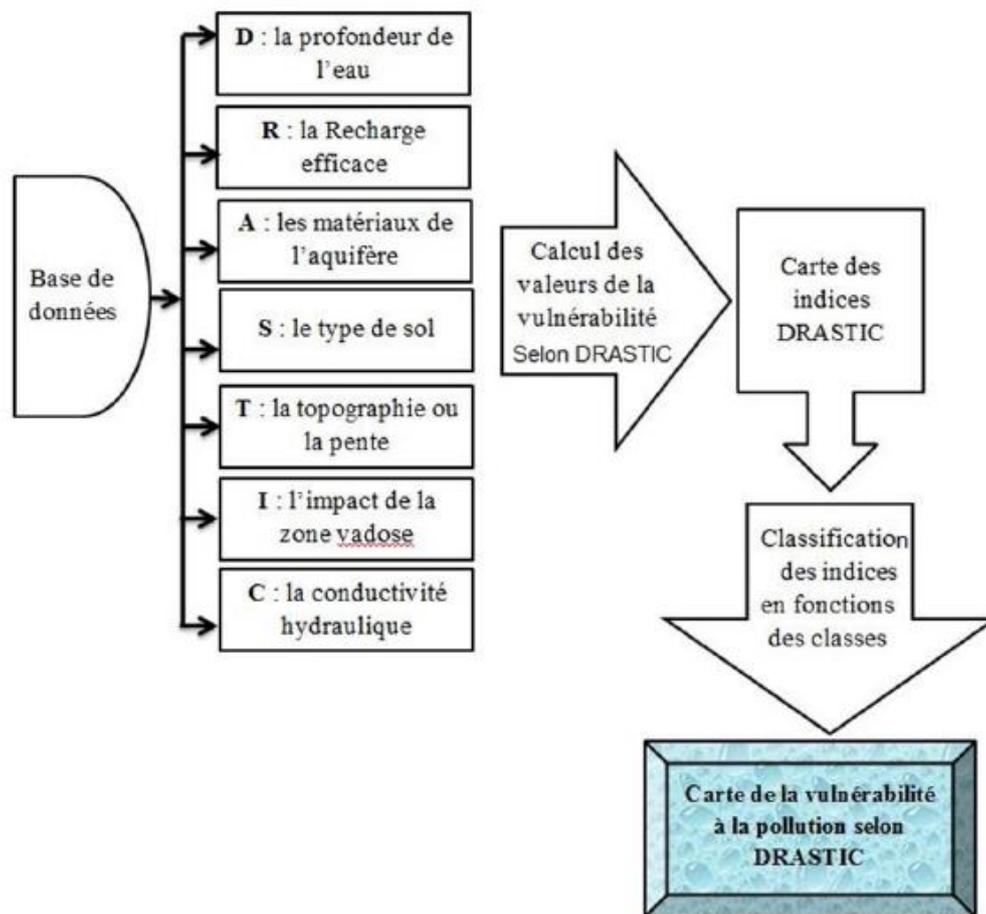


Figure 8 : Organigramme de la cartographie de vulnérabilité par la méthode DRASTIC (Simboro, 2015)

#### II.2.4 Codification et classement AHP

La méthode AHP est utilisée sur les paramètres de la méthode DRASTIC pour modifier les poids et les côtes. Cela a pour but de faire ressortir l'importance des critères et des poids dans l'expression de la vulnérabilité sur la zone d'étude. En effectuant différentes combinaisons les méthodes DRASTIC – AHP, AHP – DRASTIC et AHP – AHP sont obtenues. Le nom de la méthode permet de savoir quels poids et côte sont utilisés pour la détermination de l'indice de vulnérabilité. De façon plus explicite, dans la méthode DRASTIC - AHP pour déterminer l'indice de vulnérabilité il est considéré les côtes DRASTIC d'origine et les poids obtenues



par la méthode AHP ; pour la méthode AHP – DRASTIC, les côtes AHP obtenus et les poids DRASTIC d'origine. Le même principe s'applique à la méthode AHP – AHP.

En utilisant les poids et les côtes AHP et DRASTIC de ces différentes manières, on cherche à représenter avec plus de précision les zones de vulnérabilité sur le site d'étude.

La méthode AHP est utilisée dans notre étude pour déterminer le poids des paramètres et des critères en passant par trois étapes essentielles.

D'abord, une structure hiérarchique est mise en place pour décomposer la méthode DRASTIC et la simplifier. Plusieurs niveaux sont ainsi obtenus : un niveau regroupant les paramètres de la méthode DRASTIC et un autre niveau regroupant les critères constituant chacun de ces paramètres. Ensuite par niveau, une combinaison binaire est faite. Cette combinaison binaire consiste à prendre les paramètres 2 à 2 et leur assigner des notes en fonction de leur importance dans l'atteinte de notre objectif principal. Les notes se donnent sur la base d'une échelle de 9 niveaux élaborés par El Morjani (2002). L'échelle est présentée dans le tableau 12.

Tableau 12 : Valeurs des notes attribuées lors de l'évaluation de l'importance de deux éléments (El Morjani 2002)

| <b>Expression d'un critère par rapport à un autre</b> | <b>Note</b> |
|---|-------------|
| Même importance                                       | 1           |
| Modérément important                                  | 3           |
| Fortement important                                   | 5           |
| Très important  | 7           |
| Extrêmement important                                 | 9           |
| Modérément moins important                            | $1/3$       |
| Fortement moins important                             | $1/5$       |
| Moins important                                       | $1/7$       |
| Extrêmement moins important                           | $1/9$       |

De cette combinaison linéaire ressort plusieurs matrices carrées. Ce sont ces matrices carrées qui vont nous permettre de calculer les poids. Le calcul des vecteurs propres ( $V_p$ ),



coefficients de pondération (Cp) et le ratio de cohérence (Rc) aboutit à l'optimisation des poids et des côtes DRASTIC au niveau de chaque matrice.

$$V_p = \sqrt[N]{W_1 \times \dots \times W_N} \quad (\text{Eq.7})$$

$$C_p = \frac{V_p}{V_{p_1} \times \dots \times V_{p_N}} \quad (\text{Eq.8})$$

$$R_c = \frac{I_c}{I_a} \quad (\text{Eq.9})$$

$$\text{Où } I_c = \frac{(\lambda_{max} - N)}{(N - 1)} \quad (\text{Eq.10})$$

Avec :  $I_c$  l'indice de cohérence,  $I_a$  l'Indice aléatoire,  $N$  le nombre de paramètres comparés,  $\lambda_{max}$  la plus grande des valeurs propres.

La vérification de la cohérence des jugements est nécessaire à travers le calcul du ratio de cohérence (Rc) qui doit être toujours inférieur ou égal à 10%. Si le cas contraire se présente, il faut réévaluer les notes attribuées.

L'indice aléatoire  $I_a$  est fonction du nombre de paramètres comme on peut le voir dans le tableau 13.

Tableau 13 : Indicateurs de cohérence aléatoire  $I_a$

| N         | 1 | 2 | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    |
|-----------|---|---|------|------|------|------|------|------|------|
| <b>Ia</b> | 0 | 0 | 0.58 | 0.90 | 1.12 | 1.24 | 1.32 | 1.41 | 1.41 |

Selon Saaty (1980), lorsque la méthode AHP est appliquée sur un ou deux paramètres le Rc et le  $I_c$  sont automatiquement égaux à 0.

Au final une fois les poids obtenus, on applique le même principe que celui du calcul de l'indice de vulnérabilité DRASTIC c'est - à - dire en utilisant la formule

$$S = \sum_{i=2}^N W_i X_i \quad (\text{Eq.11})$$

Avec  $S$  l'indice,  $W_i$  le poids du paramètre et  $X_i$  la côte du critère .

Comme illustration, on a un endroit donné dont la profondeur de l'eau est la suivante :

Tableau 14 : Exemple de valeurs de profondeur d'eau en un point donné

| Valeurs | Profondeur |
|---------|------------|
| 1       | 45         |
| 2       | 22         |
| 3       | 18         |
| 4       | 32         |

En prenant en compte les critères de ce paramètre et les côtes DRASTIC, il est obtenu le tableau suivant :

Tableau 15 : Exemple d'attribution des côtes en fonction des critères DRASTIC

| Valeurs | Profondeur | Critère     | Côtes |
|---------|------------|-------------|-------|
| 1       | 45         | > 30,4 m    | 1     |
| 2       | 11         | 9,1 – 15,2  | 5     |
| 3       | 13         | 9,1 – 15,2  | 5     |
| 4       | 25         | 22,8 – 30,4 | 2     |

Le nombre de critères renseigné sur l'ordre de la matrice, dans le présent cas il s'agit d'une matrice d'ordre 3. Les critères sont comparés deux à deux en fonction de leur côte et une note est attribuée en s'appuyant sur le tableau 13.

- Un élément appartenant à l'intervalle 9,1-15,2 est modérément plus important qu'un élément de > 30,4 m. On lui assigne une valeur intermédiaire de 4.
- Un élément appartenant à l'intervalle 9,1-15,2 est modérément plus important qu'un élément de 22,8 – 30,4. On lui assigne une valeur intermédiaire de 3.
- Un élément appartenant à l'intervalle 22,8 – 30,4 est de même importance qu'un élément de > 30,4 m. On lui assigne une valeur intermédiaire de 1.

Le calcul de  $V_p$ ,  $C_p$  et  $R_c$  en appliquant les équations précédentes est ensuite effectué et la matrice suivante est obtenue.

Tableau 16 : Exemple de matrice de détermination des poids et des côtes

|             | 9,1 - 15,2 | 22,8 - 30,4 | > 30,4 | $V_p$ | $C_p$       |
|-------------|------------|-------------|--------|-------|-------------|
| 9,1 - 15,2  | 1          | 4           | 3      | 2,29  | <b>0,63</b> |
| 22,8 - 30,4 | 1/4        | 1           | 1      | 0,63  | <b>0,17</b> |
| > 30,4      | 1/3        | 1           | 1      | 0,69  | <b>0,19</b> |
| Total       | 1 9/12     | 6           | 5      | 3,61  | <b>1</b>    |



Avec  $I_c = 0,005$  et  $R_c = 0,008$  qui est inférieur à 0,1 donc l'attribution des notes est cohérente et acceptable. Les valeurs de  $C_p$  obtenues représentent les nouvelles valeurs de côte DRASTIC pour les critères considérés. Plus la valeur du poids est grande, plus on se retrouve dans des conditions de grande vulnérabilité.

## II.2.5 Cartographie des zones de vulnérabilité par les méthodes AHP – DRASTIC, DRASTIC – AHP, AHP – AHP

Suite à l'application de la méthode AHP, des côtes et des poids sont obtenus. En fonction des méthodes dérivées (DRASTIC - AHP, AHP - DRASTIC, AHP - AHP), l'indice de vulnérabilité est calculé selon l'éq. 11. Pour les méthodes DRASTIC - AHP et AHP – DRASTIC, la carte de vulnérabilité est dessinée en prenant en compte le classement donné par le tableau 17 :

Tableau 17 : Classification des vulnérabilités en fonction des indices obtenus par les méthodes dérivées (Ministry of Water Resources, 1993)

| Valeur  | Degré de vulnérabilité |
|---------|------------------------|
| 1 (0,1) | Très faible            |
| 2 (0,2) | Faible                 |
| 3 (0,3) |                        |
| 4 (0,4) | Moyenne                |
| 5 (0,5) |                        |
| 6 (0,6) |                        |
| 7 (0,7) | Elevé                  |
| 8 (0,8) |                        |
| 9 (0,9) | Très élevé             |
| 10 (1)  |                        |



## II.2.6 Validation et analyse comparée des cartes de vulnérabilité

### II.2.6.1. Validation des cartes de vulnérabilité

La validation de l'évaluation de la vulnérabilité à la pollution a été effectuée sur la base des données de qualité de l'eau obtenues par cette étude. En effet, plusieurs auteurs (Jourda et al., 2007; Neshat et al, 2014; Chandoul et al, 2008 ; Kouamé, 2007) ont validés leurs cartes sur la base des résultats d'analyse chimique. Cette validation a été réalisée en effectuant une comparaison entre la répartition des degrés de qualité des eaux obtenus grâce à l'analyse des points d'échantillonnage et la distribution des classes de vulnérabilité. La classe de très faible vulnérabilité est associée aux eaux d'excellente qualité ; les classes de faible et moyenne vulnérabilité aux eaux de bonne qualité et les classes de forte et de très forte vulnérabilité aux eaux de mauvaise qualité.

### II.2.6.2. Analyse comparée des cartes

Comparer les méthodes d'évaluation revient à voir si ces méthodes sont corrélées deux à deux et déterminer la méthode qui offre le plus de marge de sécurité. L'analyse de surface permet de connaître la différence qui existe entre les cartes de vulnérabilité élaborées par les différentes méthodes. Cette analyse prend le fait qu'il y aura des valeurs d'indices identiques d'une carte à l'autre et que les cartes soient concordantes.

La concordance des cartes se traduit par des variations d'indices semblables d'une carte à l'autre sur l'ensemble du territoire (Murat, 2000 in Kouamé 2007). Pour la présente étude, des indices ont été assignés à chaque classe de vulnérabilité comme présenté dans le tableau 18 :

Tableau 18 : Indices et classes de vulnérabilité

| <b>Classe de vulnérabilité</b> | <b>Indice</b> |
|--------------------------------|---------------|
| Très Faible - Faible           | 1             |
| Moyenne                        | 2             |
| Elevée – Très élevée           | 3             |



Dans un premier temps, la surface occupée par chaque classe a été calculée et transformée en pourcentage. Puis dans un second temps à partir de l'outil "raster calculator" du module Spatial Analyst de ArcGIS, la différence des cartes de vulnérabilité a été réalisée deux à deux. En fonction du signe de l'opération, la tendance de l'évaluation de la vulnérabilité est connue. La valeur nulle de l'opération indique que les deux méthodes effectuent une évaluation identique.

Soit A et B les deux méthodes de cartographies de vulnérabilité à comparer. Si le signe de l'opération  $A - B$  est négatif alors A sous - évalue par rapport à B. Dans le cas où le signe est positif A surévalue par rapport à B.

#### II.2.7 Conclusion partielle

Dans cette partie consacrée à la méthodologie, il a été présenté de façon détaillée les différentes étapes de cette étude. Le choix des points d'échantillonnage a été fait en prenant en compte l'occupation du sol du district de Chaoyang. Les échantillons prélevés sont ensuite envoyés au Center Testing International (CTI) pour analyse. Les résultats d'analyse permettent de faire une catégorisation par les normes de qualité GB / T14848-93 et de faire une classification par la méthode de valeur F. Cette classification permettra de connaître l'impact de l'occupation du sol sur la qualité des eaux souterraines du District de Chaoyang.

Dans le second volet de cette partie méthodologie, il a décrit le processus de caractérisation de la vulnérabilité par l'application des méthodes DRASTIC et AHP. La méthode DRASTIC et ses dérivées (DRASTIC-AHP, AHP-DRASTIC et AHP-AHP) sont présentées et leur processus de cartographie décrit. Les cartes devront être validées sur la base des degrés de qualité obtenus grâce à la méthodologie du premier volet. Les cartes seront ensuite comparées deux à deux afin de déterminer celle qui permettra la prise de décision de mesures de protection les plus sécuritaires.



### III. Résultats et discussions

Dans cette section, il sera exposé les résultats obtenus pour cette étude à partir de la méthodologie énoncée plus tôt. Dans un premier temps, la classification de la qualité des eaux souterraines sera donnée et une réflexion sur les résultats obtenus sera proposée. Dans un second temps, il sera montré comment la cartographie des zones vulnérables par la méthode DRASTIC et ses dérivées peut aider dans une prise de décision pour la protection des eaux souterraines dans le district de Chaoyang.

#### III.1. Identification et caractérisation des sources de pollution

##### III.1.1 Identification des sources potentielles de pollution

Sur la base des critères énoncés en méthodologie et de l'occupation du sol, il a été choisi 72 points d'échantillonnage répartis à travers le district (figure 9). Ce sont :

- 32 lieux de forte habitation, lieux publics hautement fréquentés ;
- 3 hôpitaux ;
- 12 stations d'eau (contrôle, traitement, approvisionnement) ;
- 1 centre piscicole ;
- 8 industries ;
- 6 terrains (2 jardins, 3 terrains de golf arrosés à l'eau usée traitée et 1 domaine agricole) ;
- 1 station de traitement de déchets solides ;
- 9 eaux de surface (4 rivières, 5 lacs).

Le détail sur les points d'échantillonnage est donné dans l'annexe 3.

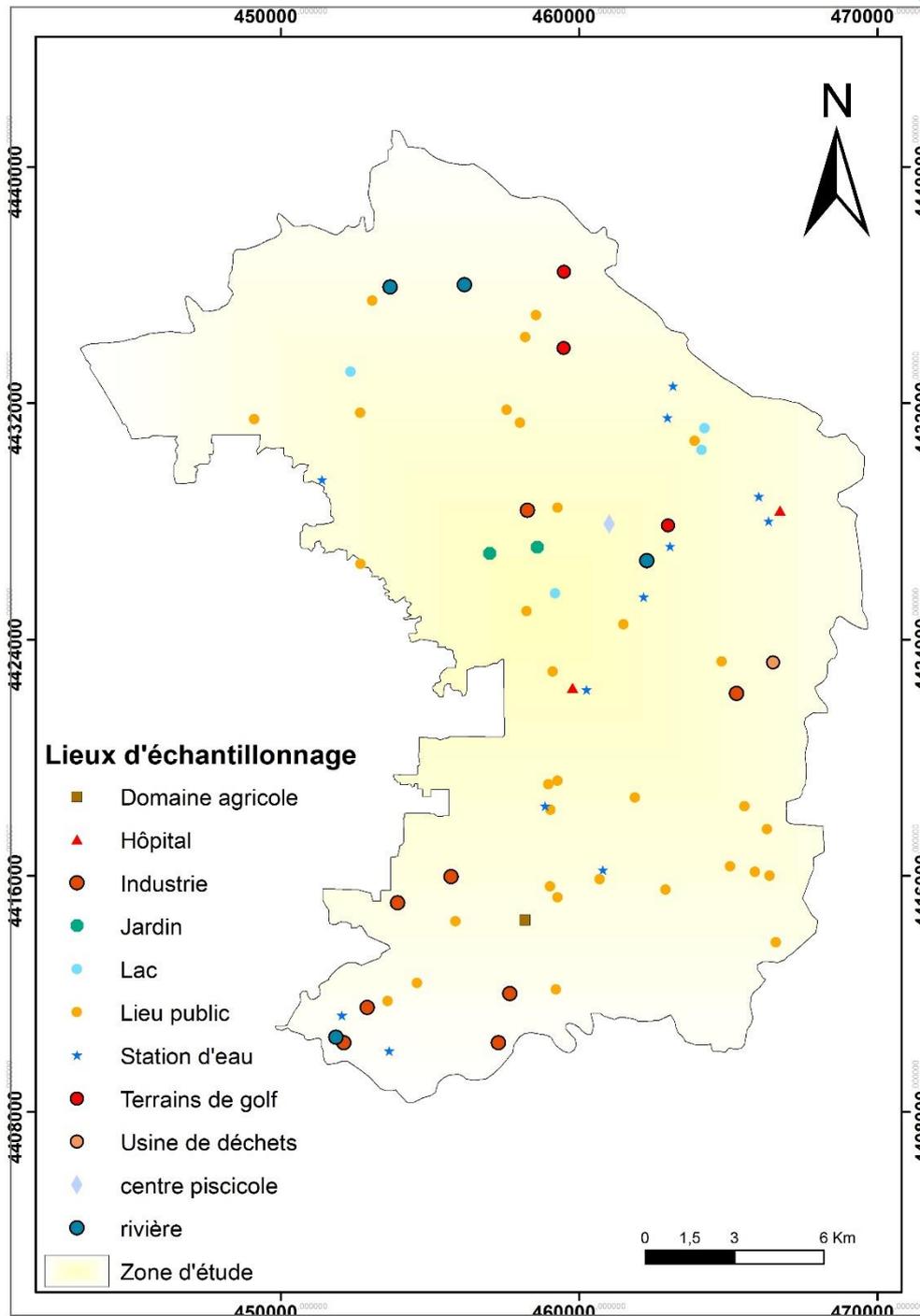


Figure 9 : Points de prélèvement en fonction de la nature du lieu

Ces points ont été choisis en prenant en compte des études et enquêtes mais aussi les différentes informations collectées sur l'occupation du sol. Ces informations ont permis de distinguer les types de pollution énumérées ci-dessous :

### III.1.1.1. La pollution par infiltration des eaux de surface contaminées

Les eaux de surface dans le district de Chaoyang sont principalement composées de rivières, lacs et canaux de drainage et il est su que la recharge des aquifères confinés du district est faite par infiltration de ces eaux de surface. Le réseau d'assainissement des eaux usées mis en place est dépassé. En effet, aujourd'hui ce réseau présente de nombreuses insuffisances. Lorsque survient la période des pluies et des inondations, les eaux usées du réseau souterrain (égouts) sont directement entraînées vers la rivière entraînant une détérioration de sa qualité. De plus, certaines installations urbaines déversent leurs eaux usées non traitées directement dans les rivières occasionnant leur pollution. C'est l'infiltration de cette eau de rivière dans le sol qui contamine les eaux souterraines (figures 10 et 11).



Figure 10: Rivière polluée à Chaoyang (Zhang,2014)



Figure 11: Eaux usées lors de l'inondation du 31/ 07/06 (Zhang,2014)

### III.1.1.2. Pollution chimique et pétrolière

A Chaoyang, plus de 50 millions de yuans (soit 6 447 000 d'euros) sont investis dans le domaine de l'industrie. Il y a environ 700 usines réparties dans le centre - ville et le Sud - Ouest. Parmi ces 700 usines, on retrouve 200 grandes et moyennes entreprises (Wang, 2012). Ces industries sont une des principales sources de pollution de la qualité de l'eau. Elles sont issues pour la majorité de l'industrie chimique, du colorant, de la fabrication du papier, des pesticides, de l'électronique, de la production d'électricité.

Les eaux usées industrielles contiennent des substances nocives telles que le phénol, l'acide, le sel, l'huile. Selon le département de protection de l'environnement, plus de 100 sortes de ces eaux usées contiennent des métaux lourds nuisibles et sont déversées dans les rivières sans

subir un réel traitement (figure 12). Avec le problème de dépôt de crasses, de purification et d'évacuation des eaux usées industrielles et de l'absence de conduites souterraines nécessaires, l'environnement souterrain de la zone industrielle est gravement affecté par la pollution. Certaines entreprises d'extraction pétrolière ne prennent pas toutes les précautions nécessaires pour éviter que le pétrole ne se retrouve dans les eaux.



Figure 12 : Déversement d'eau usée industrielle dans une rivière

### III.1.1.3. Pollution par les déchets solides municipaux

Les déchets solides urbains en raison de leur composition complexe sont très difficiles à dégrader. Lorsqu'ils sont acheminés vers les stations de traitement de déchets, ils passent par long processus afin d'être enfoui dans le sol. A cause de la longue durée de la mise en décharge et de l'échec de certaines mesures anti - filtration, le lixiviat provenant de ces déchets peut s'infiltrer.

De plus, il a été observé de nombreuses décharges informelles à Chaoyang. Sur les 70 sites de décharge d'ordures, 14 sont des décharges informelles soit environ 20% de l'ensemble (Shuang, 2016). Lorsque les précipitations frappent les ordures de ces décharges, on a la production de lixiviat qui n'est pas traité puisqu'il ne s'agit pas d'un environnement contrôlé. Ce lixiviat peut aussi s'infiltrer et causer la pollution des eaux souterraines (figures 13 et 14).



Figure 13: Décharge informelle d'ordure



Figure 14 : Présence d'ordures dans une rivière

#### III.1.1.4. Pollution par les pesticides agricoles

Les pesticides ont joué un important rôle dans le processus de production agricole. Ces pesticides sont constitués de substances hautement toxiques. De plus, après utilisation avec leur forte mobilité dans le sol, ils sont facilement lixiviés et entraînés vers les eaux souterraines.

#### III.1.2 Caractérisation des sources de pollution

En s'appuyant sur les résultats d'analyse, il a été possible de déterminer la qualité des eaux souterraines au niveau des différents points d'échantillonnage (Figure 15). Les détails des calculs par la méthode F et les classes de qualité trouvées ont été répertoriées dans l'annexe 4.

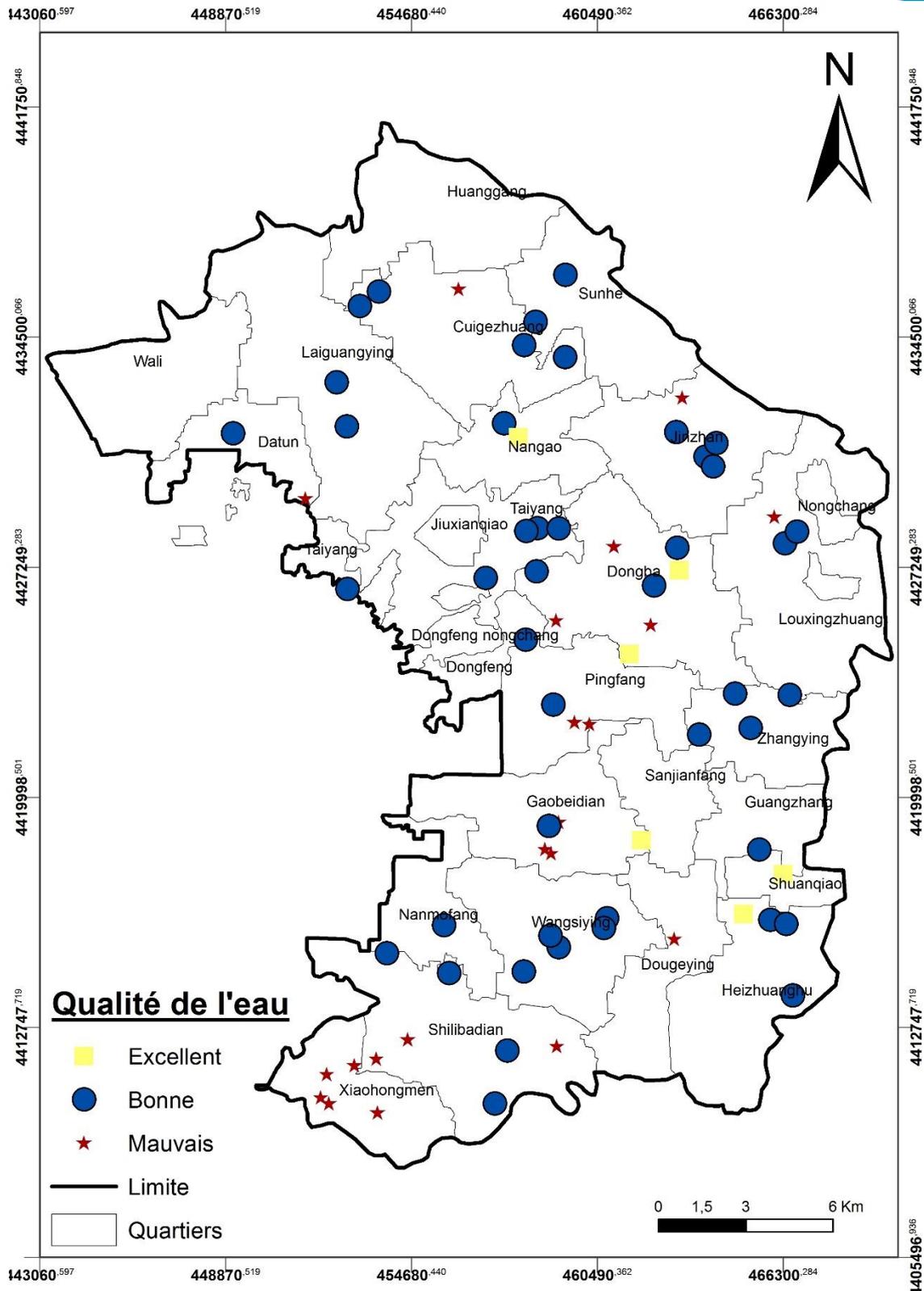


Figure 15: Qualité des eaux aux points d'échantillonnage selon les normes GB/T14848-93

Sur les 72 points d'échantillonnage, la qualité de l'eau souterraine est :

- Mauvaise pour 22 points soit 30, 56% ;
- Bonne pour 45 points soit 62, 5% ;
- Excellente pour 5 points soit 6,94%.

En s'appuyant sur ces pourcentages, le constat fait est que les eaux souterraines dans le district de Chaoyang sont majoritairement qualifiées de bonne.

Les eaux d'excellente qualité sont peu nombreuses. Elles sont principalement situées à Heizhuangzhu, Guangzhuang, Sanjianfang et Dongba au niveau de petites agglomérations. A ces endroits de prélèvement, les activités anthropiques sont très faibles et il n'y a pas d'industries implantées. Ces facteurs peuvent justifier le manque de pollution des eaux dans ces endroits.

Les endroits où l'eau a été identifiée comme étant de mauvaise qualité sont présentés dans le tableau 19.

Tableau 19 : Endroits où les eaux souterraines sont de mauvaise qualité

| Identifiant | Lieux d'échantillonnage | Identifiant | Lieux d'échantillonnage |
|-------------|-------------------------|-------------|-------------------------|
| XHM-02      | Station d'eau           | PF-03       | Station d'eau           |
| XHM-04      | Industrie               | DB-07       | centre piscicole        |
| XHM-03      | rivière                 | DB-02       | Station d'eau           |
| XHM-05      | Industrie               | DB-04       | Lac                     |
| SBLD-01     | Lieu public             | PF-02       | Hôpital                 |
| GBD-02      | Lieu public             | SBLD-04     | Lieu public             |
| DGZ-01      | Lieu public             | GBD-03      | Station d'eau           |
| SH-05       | rivière                 | DT-01       | Station d'eau           |
| SBLD-05     | Lieu public             | GBD-01      | Lieu public             |
| XHM-01      | Station d'eau           | JZ-07       | Station d'eau           |
| JT-03       | Hôpital                 | JZ-06       | Station d'eau           |

Les quartiers de Shilibadian (SBLD), Datun (DT), Jinzhan (JZ), Gaobeidian (GBD), Sunhe (SH), Dougezhang (DGZ) sont des agglomérations avec de forte population de densité variant entre 1493 et 4771 hbt/km<sup>2</sup> (statistiques du district de Chaoyang, 2014). Cette forte population produit de grandes quantités d'eau usée qui, par manque de réseau d'assainissement sont déversées de façon anarchique. Etant donné que les eaux usées sont déversées dans les



rivières et que ces rivières participent à la recharge des aquifères dans le district, on déduit que cela participe la pollution des eaux souterraines dans ces agglomérations.

A Pingfang (PF) et Jiangtai (JT), les eaux souterraines testées de mauvaise qualité indique que les déchets liquides provenant des hôpitaux de ces endroits ne sont pas correctement traités avant d'être déversées dans la nature.

Le secteur de Xiaohongmen (XHM) est une zone industrielle chimique et métallurgique. La rivière est fortement sollicitée dans le fonctionnement de ces industries. Malheureusement, ces industries y déversent leurs eaux usées sans les traiter correctement. Cela est la cause de la pollution des eaux souterraines dans ce secteur.

## III.2. Caractérisation de la vulnérabilité par les méthodes DRASTIC et AHP

### III.2.1 Les paramètres DRASTIC

#### III.2.1.1. La profondeur de l'eau (D)

Le niveau statique est compris entre 28 et 90 m. En se basant sur la classification d'Aller et al (1987), il est noté que sur pratiquement toute la surface du district de Chaoyang, la profondeur de la nappe est supérieure à 30,4 m (figure 16).

En prenant en compte les spécifications de la méthode DRASTIC, la côte de valeur 1 est attribuée à toute profondeur supérieure à 30,4 m et la côte de valeur 2 à toute valeur comprise entre 22,8 et 30,4 m.

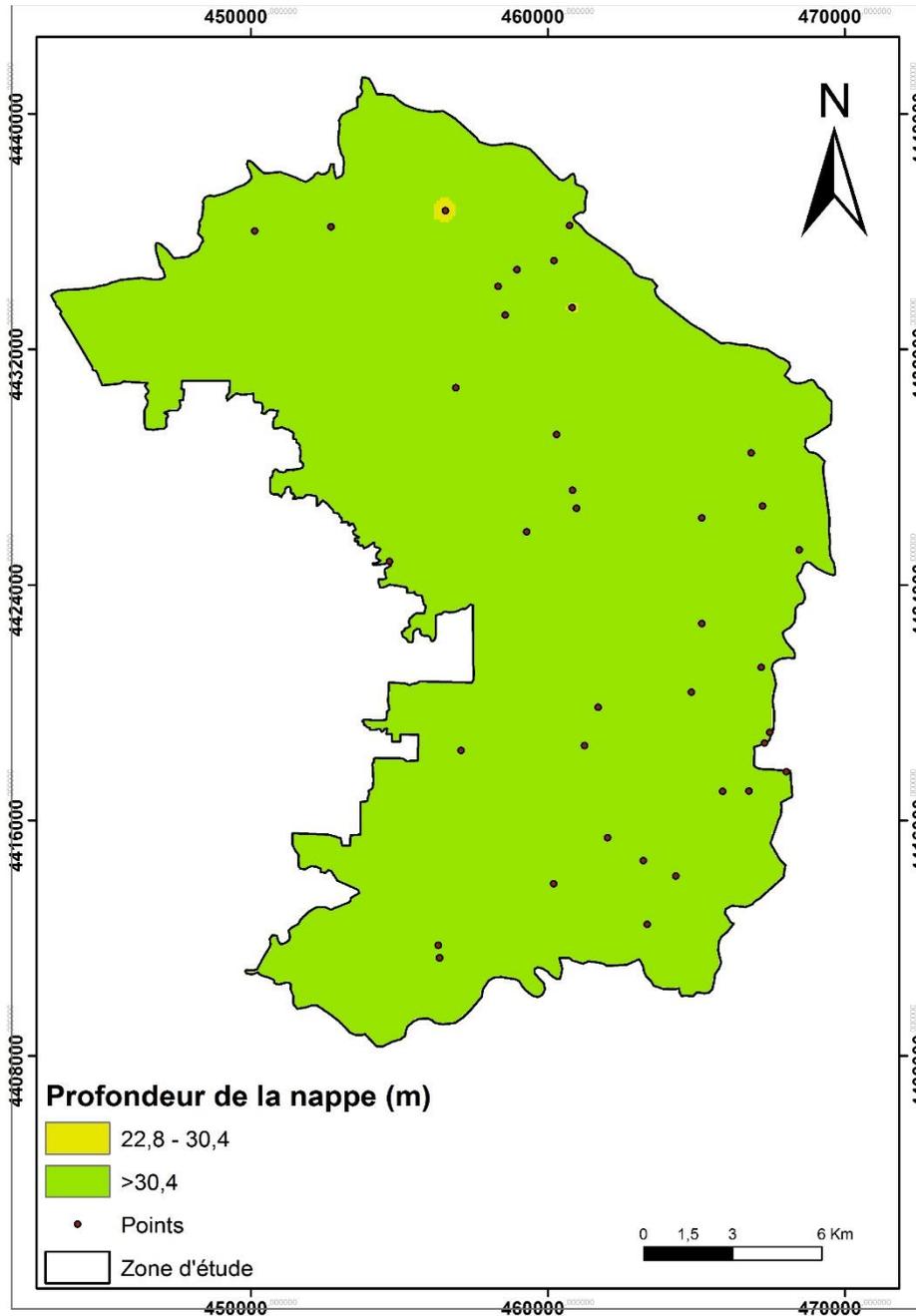


Figure 16 : Profondeur (m) de la nappe au niveau du district de Chaoyang

### III.2.1.2. La recharge nette (R)

L'équation 6 a permis le calcul de la recharge nette qui a été représentée en fonction de sa grandeur par la figure 17.

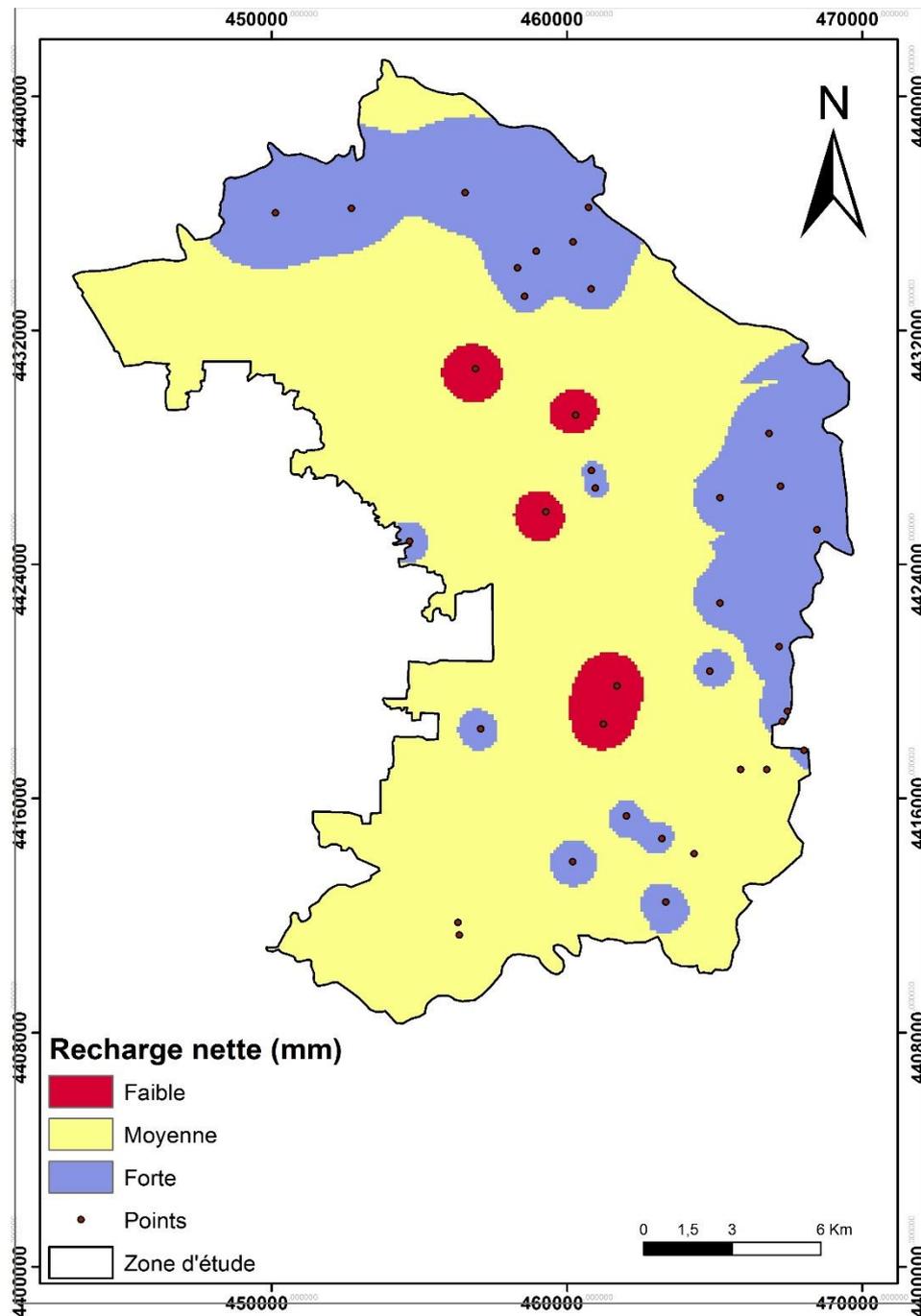


Figure 17: Répartition des intensités de la recharge nette (mm) dans le district de Chaoyang

La recharge nette varie entre 70, 675 et 183, 76 mm dans le district de Chaoyang. Les zones de forte recharge sont situées au Nord et à l'Est alors que les zones de faible recharge sont localisées au centre de ce district. La recharge moyenne est retrouvée sur la majorité du territoire. Le tableau 20 indique les côtes attribuées en fonction des classes de recharge donnée par la méthode DRASTIC :

Tableau 20 : Cotes attribuées à la recharge nette

| Recharge nette (mm) | Côtes attribuées | Intensité de la recharge |
|---------------------|------------------|--------------------------|
| 50,8 - 101,6        | 3                | Faible                   |
| 101,6 - 177,8       | 6                | Moyenne                  |
| 117,8 - 254         | 8                | Forte                    |

### III.2.1.3. Les matériaux de l'aquifère (A)

Le constat est fait que les aquifères du district de Chaoyang sont particulièrement composés d'éléments granulaires (sable, gravier et basalte). Alors que les matériaux sable et gravier dominent la composition des aquifères, il est noté la présence d'une faible proportion de basalte située au Sud-Est du district (Figure 18). Les côtes attribuées (tableau 21) sont les suivantes :

Tableau 21 : Cotes attribuées aux matériaux de l'aquifère

| Matériaux dominants des aquifères | Côtes attribuées |
|-----------------------------------|------------------|
| Sable                             | 6                |
| Sable avec gravier                | 8                |
| Basalte                           | 9                |

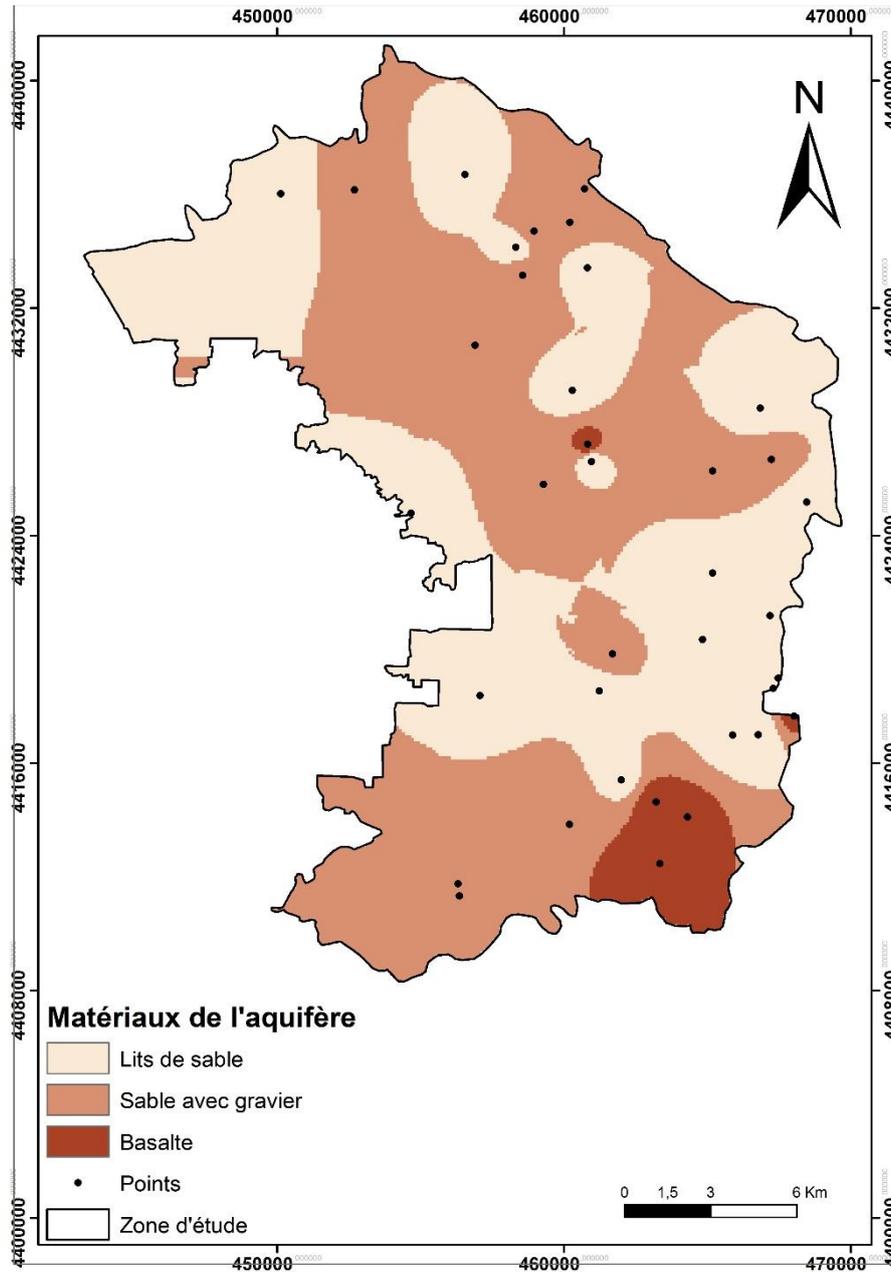


Figure 18 : Matériaux dominants dans les aquifères du district de Chaoyang

#### III.2.1.4. Le type de sol (S)

En analysant la figure 19, il est noté qu'il y a à Chaoyang trois principaux types de sols : les sols argileux, limono-sableux et des sols remblayés. On a assigné la côte 3 pour les argiles, la côte 4 pour les sols limono-sableux et la côte 5 pour les sols qui sont constitués de sable.

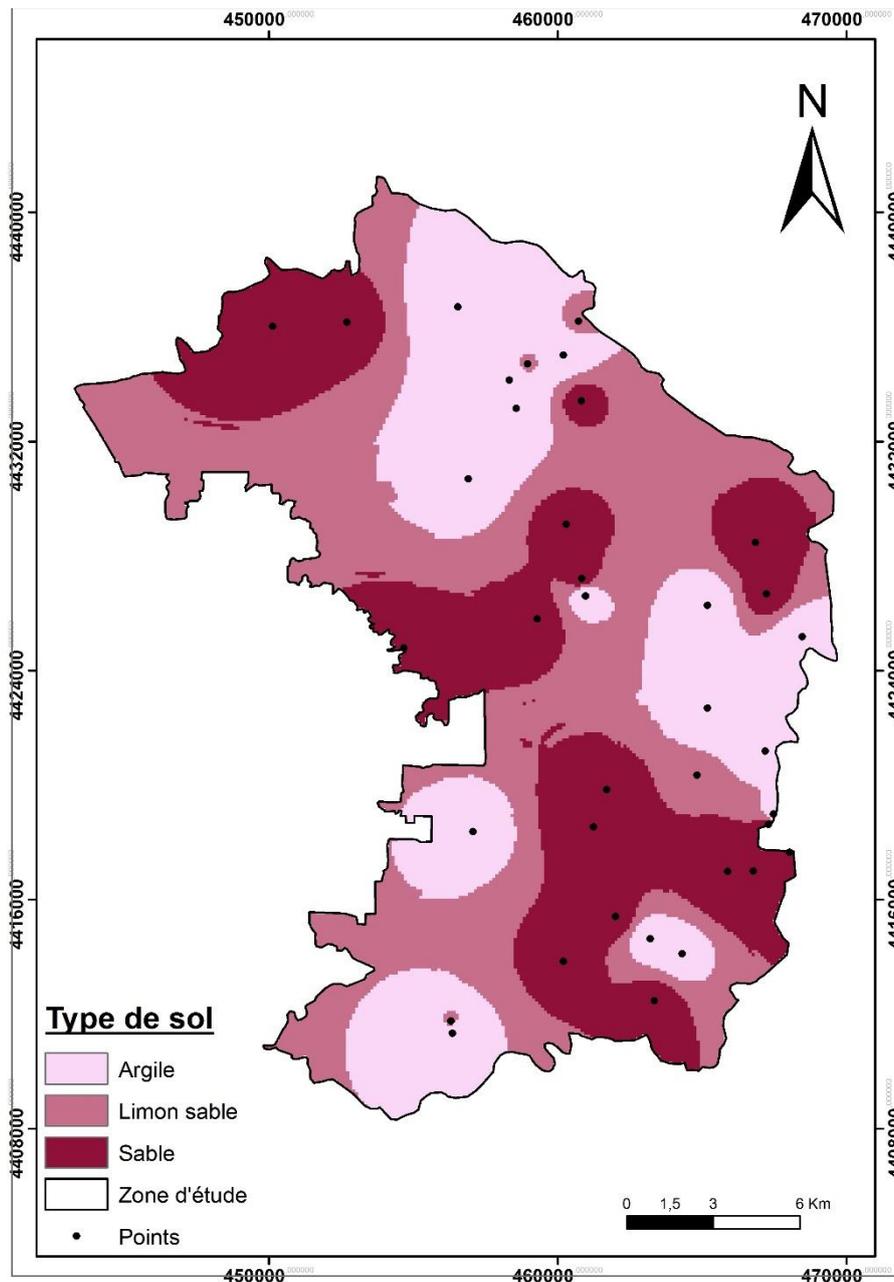


Figure 19 : Types de sols à Chaoyang

#### III.2.1.5. La topographie (T)

Le district de Chaoyang est situé dans une zone de plaine, ce qui explique les faibles altitudes observées variant de 22 à 50 m. les pentes obtenues lors du traitement de la carte topographique qui a été exploitée sont très faibles, toutes inférieures à 2% (Figure 20). La valeur de la côte considérée pour le paramètre est 10.

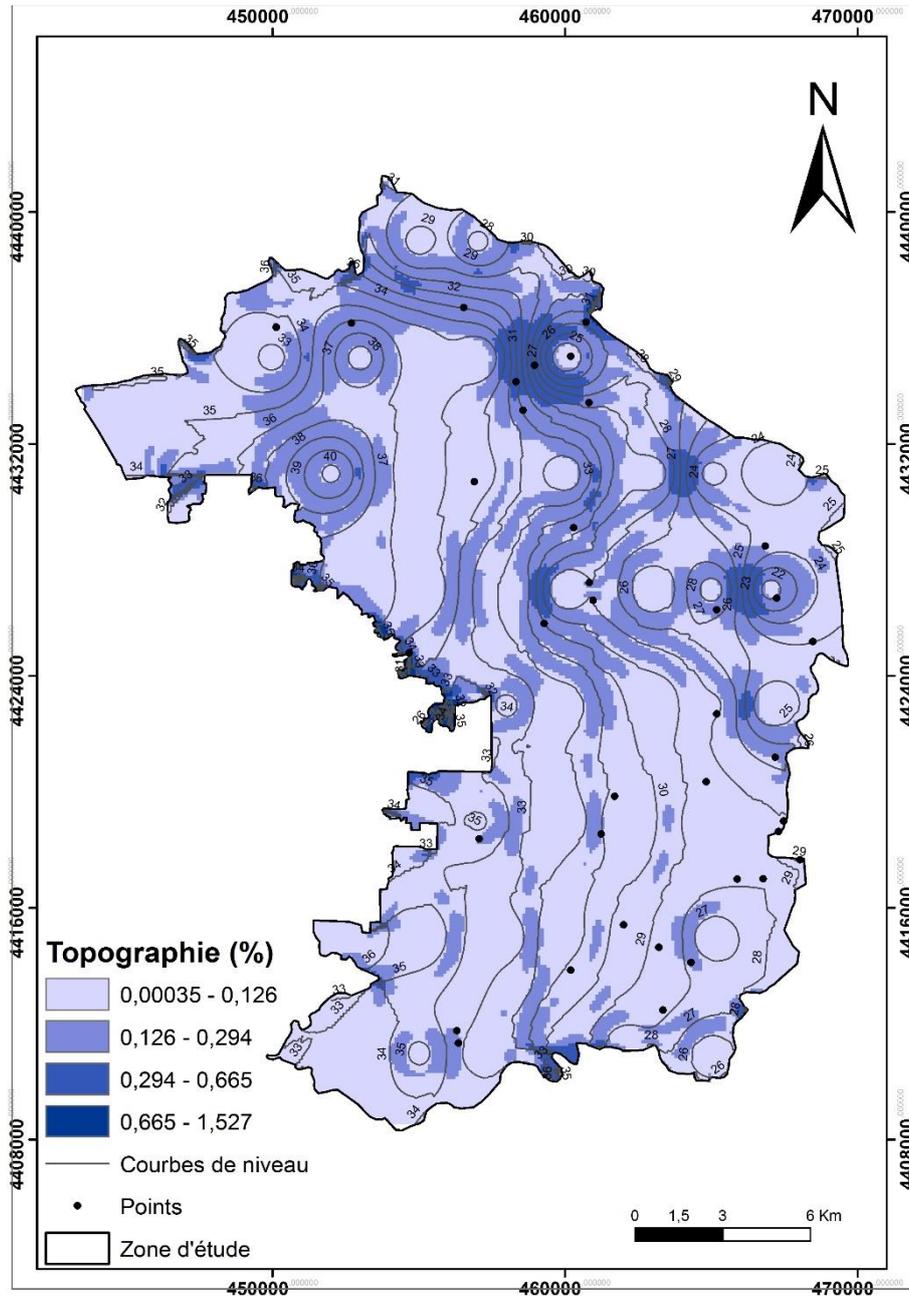


Figure 20: Topographie (%) dans le district de Chaoyang

### III.2.1.6. Impact de la zone vadose (I)

La zone vadose est majoritairement constituée du Centre - Est au Sud de schiste, limon et argile. Du Centre – Ouest au Nord le sable gravier et le basalte sont les matériaux les plus retrouvés (figure 21). Les côtes attribuées à ces éléments sont (tableau 22) :

Tableau 22 : Côtes attribuées aux matériaux de la zone vadose

| Zone vadose               | Côtes |
|---------------------------|-------|
| Schiste/Limon/Argile      | 3     |
| Sable, gravier avec limon | 6     |
| Sable, gravier            | 8     |
| Basalte                   | 9     |

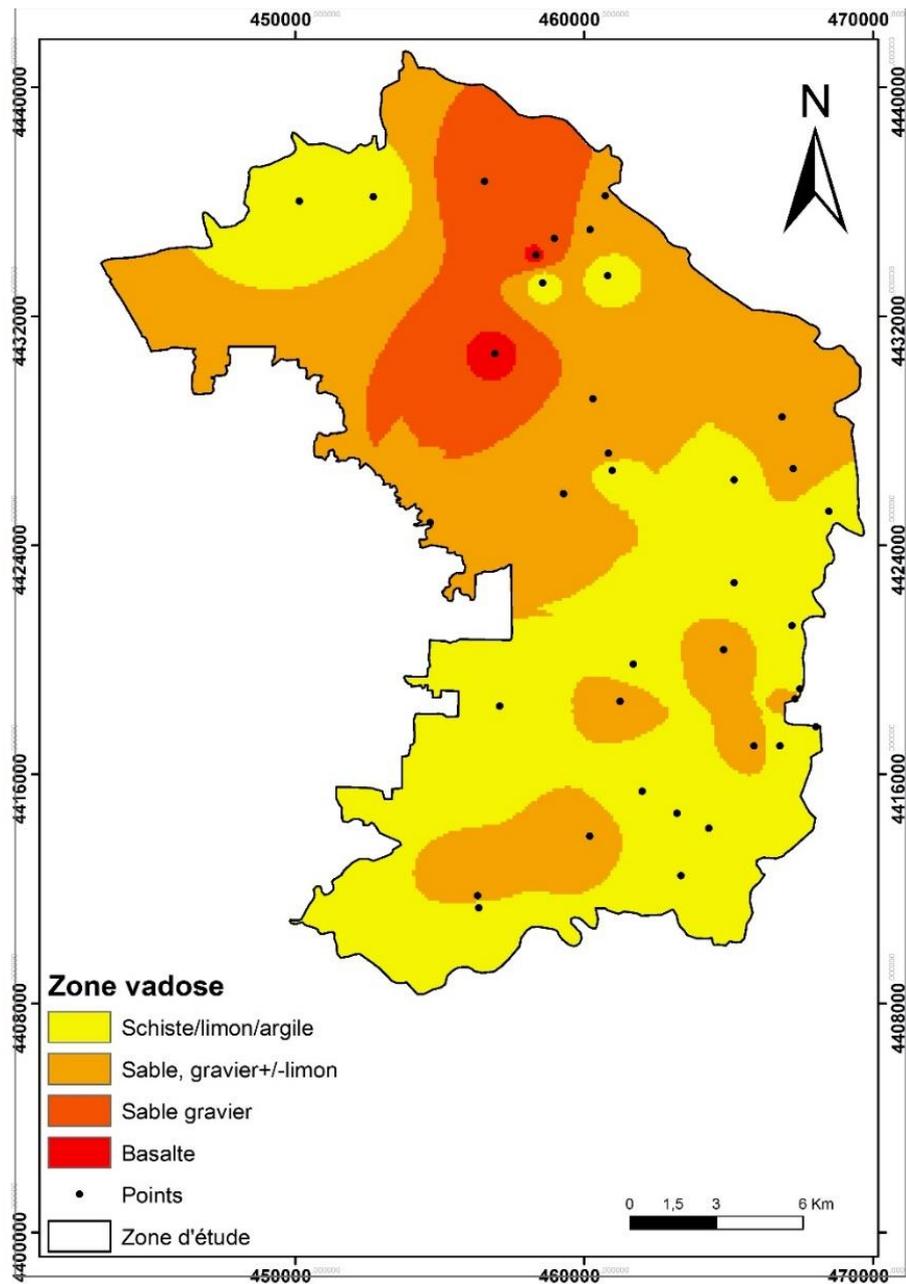


Figure 21 : Matériaux de la zone vadose dans le district de Chaoyang

### III.2.1.7. La conductivité hydraulique (C)

Les valeurs de la conductivité hydraulique dans le district de Chaoyang varient entre 14 et 33 mm/jr. La conductivité sur la plus grande partie du territoire se situe dans l'intervalle 14 – 20 mm/jr. Au Sud-Ouest et dans l'Est du district, la conductivité hydraulique est beaucoup plus grande de l'ordre de 31 à 33 mm/jr (figure 22). Les côtes attribuées sont présentées dans le tableau 23.

Tableau 23: valeurs des côtes attribuées aux classes de conductivité

| Conductivité hydraulique (m/jr) | Côtes |
|---------------------------------|-------|
| 12,3 - 28,7                     | 4     |
| 28,7 - 41                       | 6     |

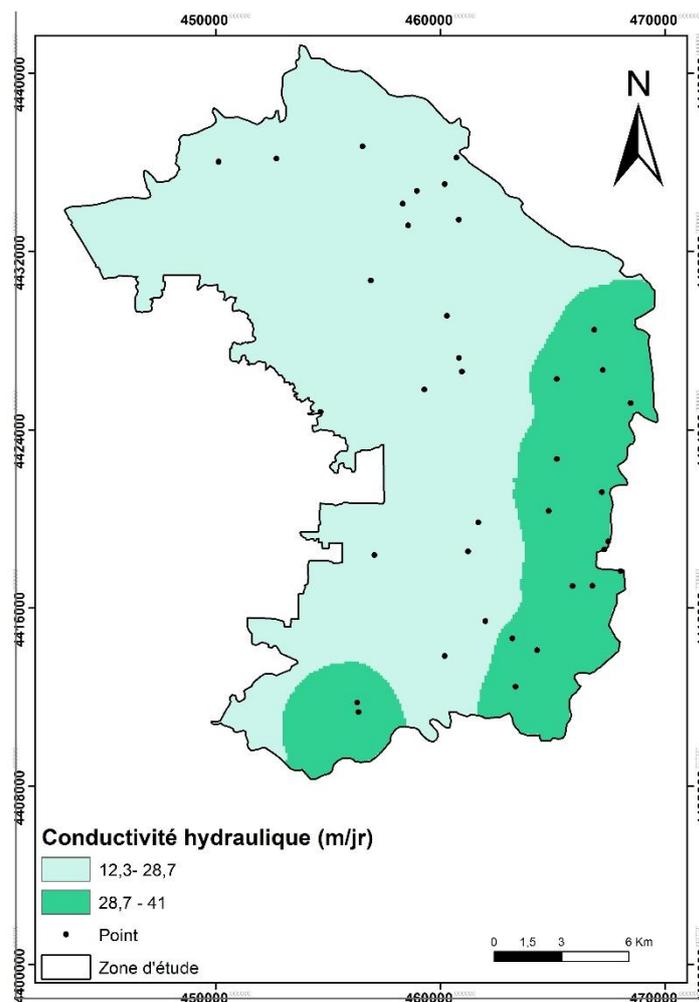


Figure 22: Valeurs de la conductivité hydraulique dans le district

### III.2.2 Cartographie de zones de vulnérabilité DRASTIC

Le calcul de l'indice DRASTIC a permis d'obtenir la carte présentée à la figure 23. Les valeurs des indices oscillent entre 88 et 129 (annexe 5). Ces indices permettent de distinguer deux classes de vulnérabilité : faible et moyenne. Les valeurs de vulnérabilité faible sont comprises dans l'intervalle 85 -114 alors que celles de vulnérabilité moyenne dans l'intervalle 115 – 145 selon l'échelle donnée par Aller et al. (1987).

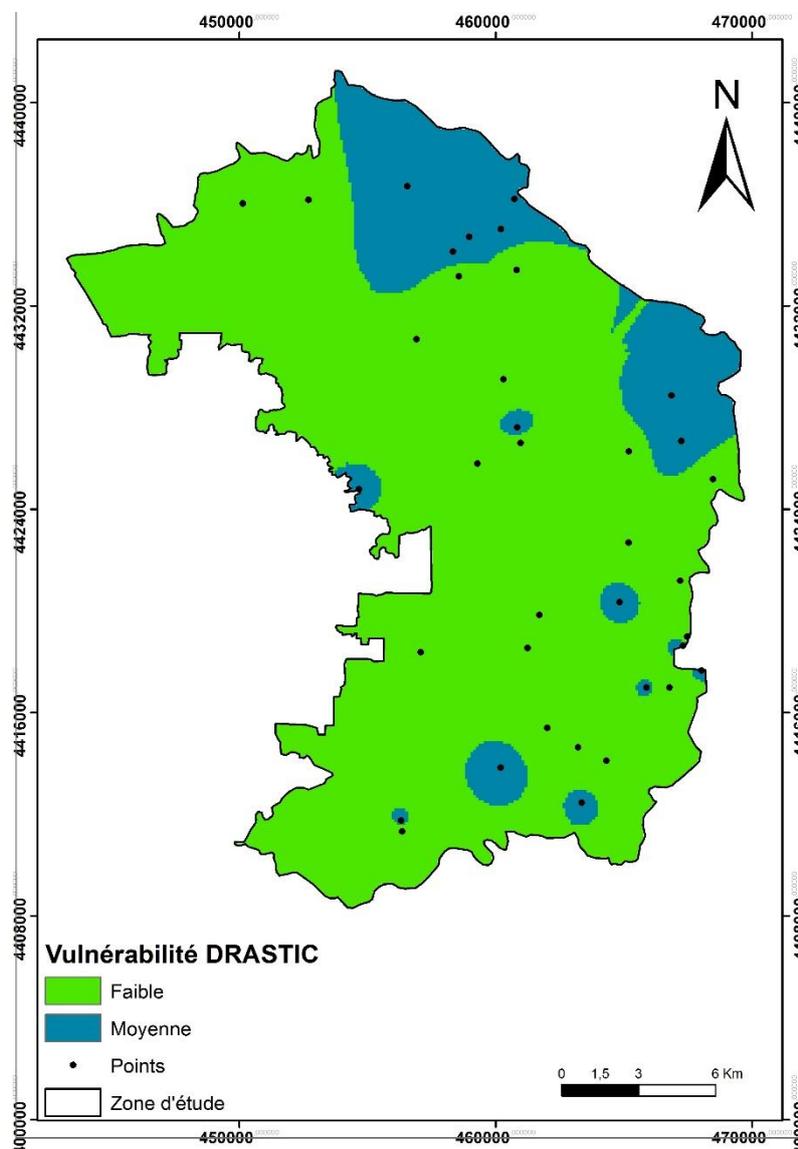


Figure 23 : carte de représentation des classes de vulnérabilité DRASTIC

La classe de valeur faible est la classe la plus dominante avec 79,82% d'occupation du territoire alors que la classe moyenne n'occupe que 20,18%.

Pour voir si cette vulnérabilité exprimée par la méthode DRASTIC est en accord avec les données de terrain, cette couche de dessin a été superposée à la couche représentant la répartition des classes de qualité d'eau (figure 24).

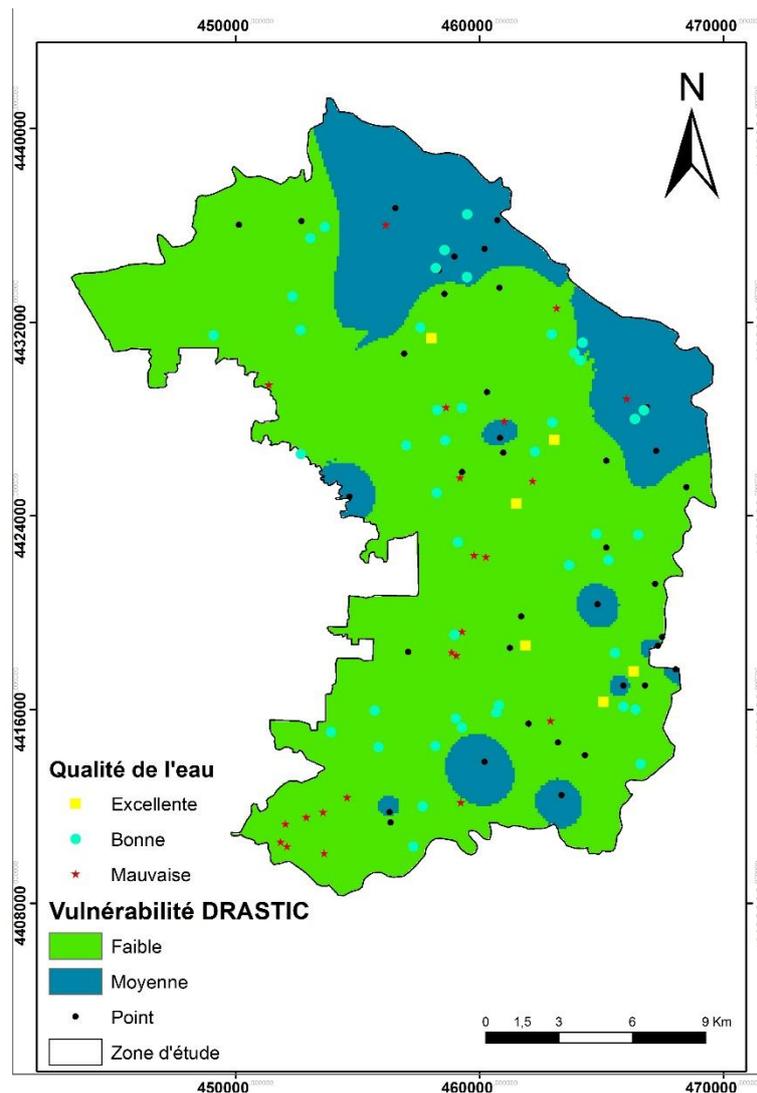


Figure 24 : Comparaison classe de vulnérabilité DRASTIC - degré de qualité de l'eau

Le tableau 24 exprime la proportion des degrés de qualité en fonction des classes de vulnérabilité.

Tableau 24 : degré de qualité en fonction des classes de vulnérabilité

| Classe de vulnérabilité | Classe de qualité                   |
|-------------------------|-------------------------------------|
| Faible                  | 6 points d'eau d'excellente qualité |
|                         | 36 points d'eau de bonne qualité    |
|                         | 20 points d'eau de mauvaise qualité |
| Moyenne                 | 8 points d'eau de bonne qualité     |
|                         | 2 points d'eau de mauvaise qualité  |

Avec 44 points de bonne qualité qui coïncident avec les classes faible et moyenne, on a un taux de coïncidence de 61,11% entre les données de terrain et le modèle.

Au vu de ces résultats, on peut conclure que ce modèle est valide. Dans les zones de faible et de moyenne vulnérabilité, des points de mauvaise qualité sont retrouvés. Cela est dû à l'intense activité humaine et industrielle en ces lieux qui, sur ces 30 dernières années a impacté sur la qualité des eaux souterraines.

### III.2.3 Cartographie des zones de vulnérabilité par les méthodes AHP – DRASTIC, DRASTIC – AHP, AHP – AHP

Après le calcul des poids et des côtes des paramètres et sous - paramètres de la méthode DRASTIC par l'application de la méthode AHP (annexe 6), les indices de vulnérabilité relatives aux méthodes dérivées AHP-DRASTIC, DRASTIC-AHP et AHP-AHP ont été calculés (annexes 7, 8 et 9). Le récapitulatif des côtes et des poids par méthode est présenté dans l'annexe 10.

#### III.2.3.1. Méthode AHP - DRASTIC

La figure 25 présente la carte de vulnérabilité obtenue à partir de la méthode AHP-DRASTIC.

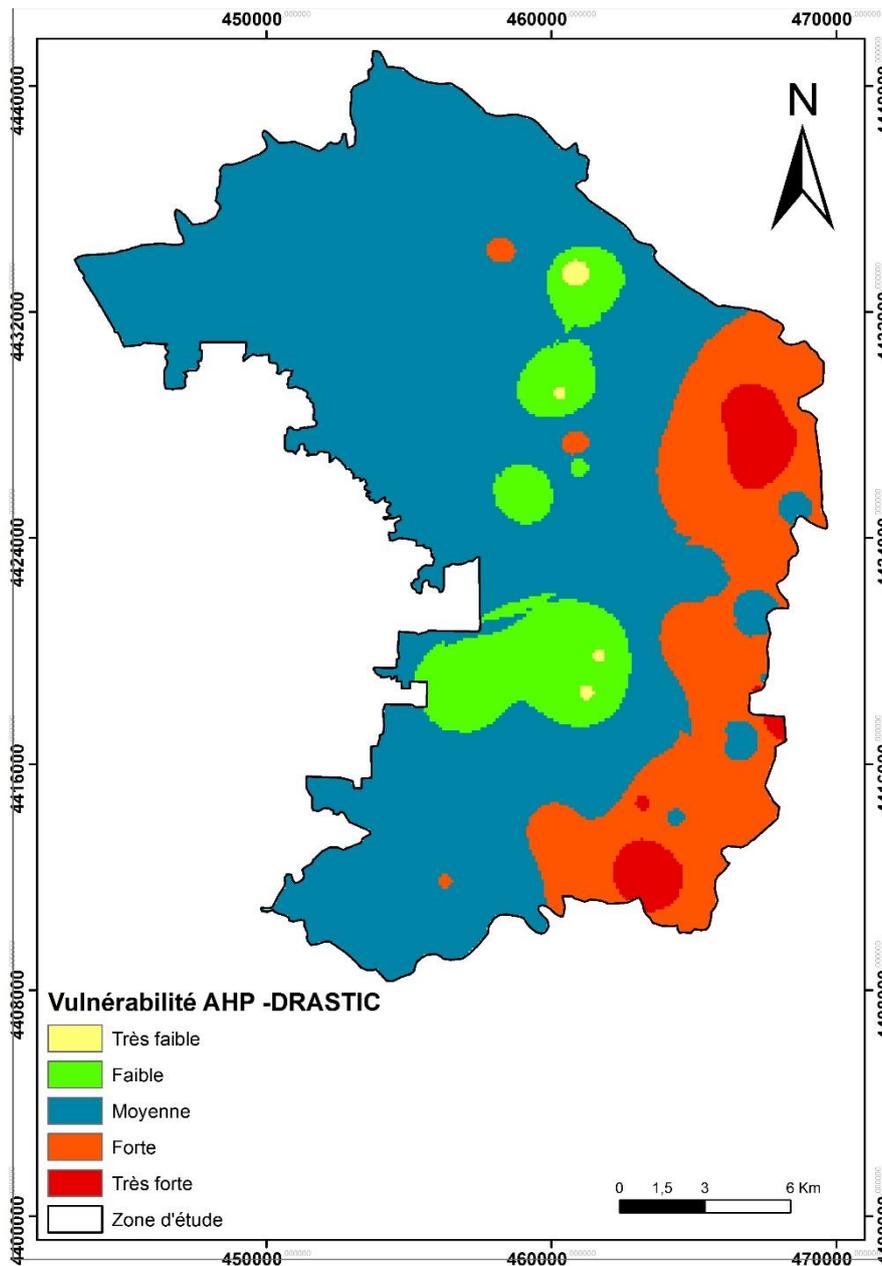


Figure 25: Carte de répartition des classes de vulnérabilité selon la méthode AHP – DRASTIC

La classe de vulnérabilité « très faible » couvre 0,19% du territoire et est représentée par de petits îlots situés au Nord et au Centre. La classe de vulnérabilité « faible », représentée par des îlots de taille moyenne situés au Centre – Est et au Nord, occupe 8,63% du district. La classe de vulnérabilité « moyenne » est celle qui est la plus répandue avec 71,34% de la surface. La classe forte avec un pourcentage de 18,12% est représentée par une bande qui

couvre toute la partie Est du district. Enfin, la classe « très forte » sous forme d'îlots couvre une superficie de 1,65% du territoire.

La figure 26 est une carte montrant la répartition de la qualité de l'eau au niveau du modèle AHP – DRASTIC.

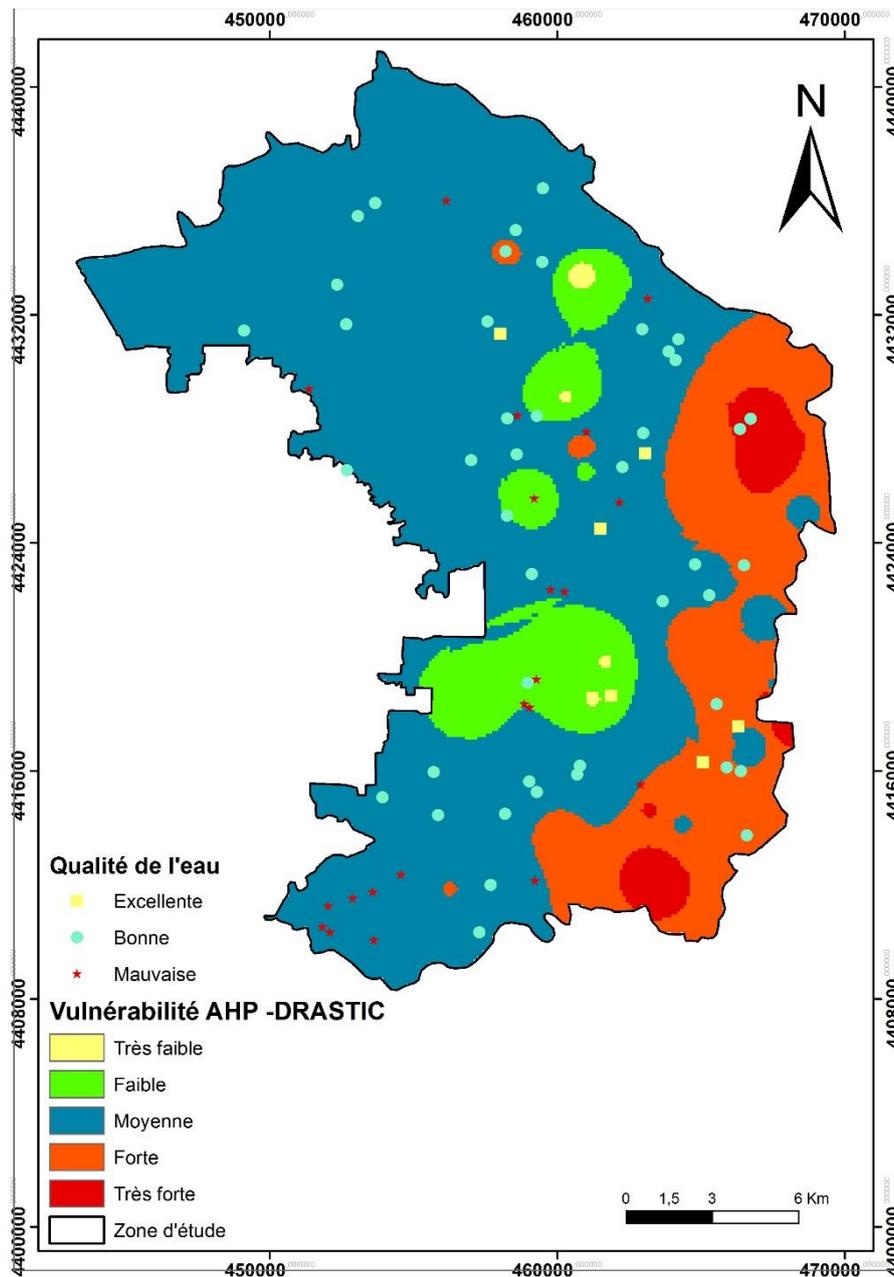


Figure 26 : Répartition des classes de qualité sur le modèle de vulnérabilité AHP - DRASTIC



L'analyse de la carte précédente permet d'obtenir le tableau 25 qui suit :

Tableau 25: Répartition des classes de qualité en fonction des classes de vulnérabilité de la méthode AHP – DRASTIC

| Classe de vulnérabilité | Classe de qualité                   |
|-------------------------|-------------------------------------|
| Très faible             | Aucun point                         |
| Faible                  | 1 point d'eau d'excellente qualité  |
|                         | 2 points d'eau de bonne qualité     |
|                         | 4 points d'eau de mauvaise qualité  |
| Moyenne                 | 3 points d'eau d'excellente qualité |
|                         | 35 points d'eau de bonne qualité    |
|                         | 15 points d'eau de mauvaise qualité |
| Forte                   | 2 points d'eau d'excellente qualité |
|                         | 10 points d'eau de bonne qualité    |
|                         | 2 points d'eau de mauvaise qualité  |
| Très forte              | 2 points d'eau de bonne qualité     |

En s'appuyant sur cette répartition, il est noté que seulement 39 points (sur les 72) ont leur classe de qualité coïncidant avec les degrés de vulnérabilité correspondants, soit un taux de coïncidence de 54,16%. Ce taux permet de valider le modèle AHP –DRASTIC réalisé.

### III.2.3.2. Méthode DRASTIC - AHP

Grâce à l'analyse de la carte exprimant la vulnérabilité donnée par la méthode DRASTIC - AHP, il est noté que la classe « très faible » est la moins étendue avec une surface de 0,26%. Cette classe est représentée par un îlot situé au centre du district. La classe « faible » représentée par un îlot beaucoup plus grand au centre du district couvre une surface de 4,09%.

Dans ce modèle, la classe « moyenne » est la plus étendue avec une surface couverte de 74,16% alors que les classes « forte » et « très forte » majoritairement situées au Nord et au Nord-Est s'étendent sur des surfaces respectives de 19,60% et 1,89%.

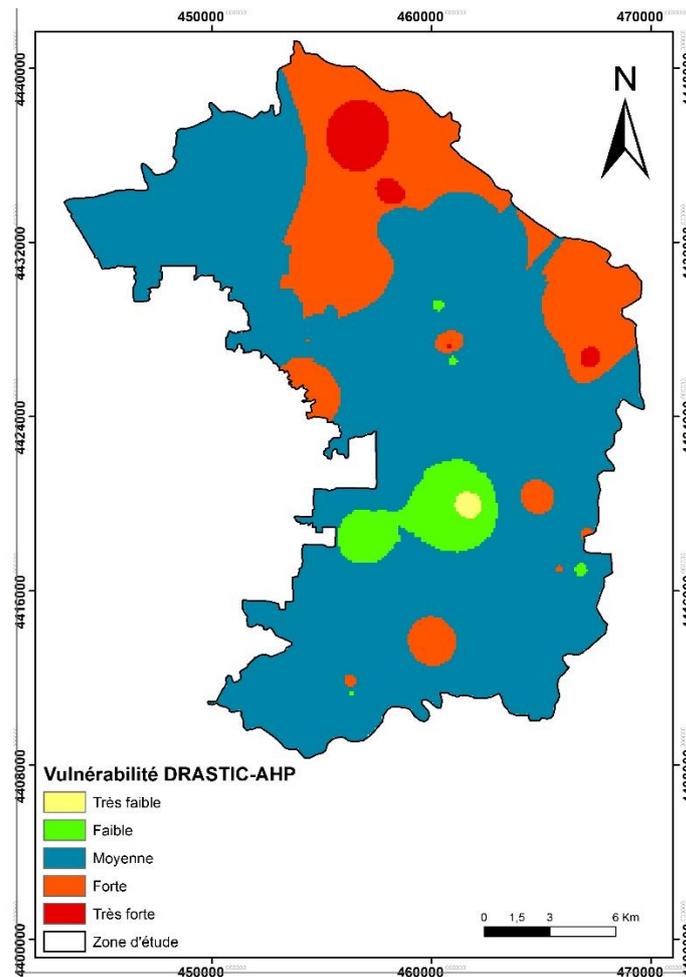


Figure 27: Répartition des classes de vulnérabilité obtenues par le modèle DRASTIC – AHP

La superposition de cette couche avec la couche des classes de qualité d'eau permet d'obtenir la figure 28. Cette figure donne les informations renseignées dans le tableau 26.

Tableau 26 : Répartition des classes de qualité en fonction des classes de vulnérabilité de la méthode DRASTIC- AHP

| Classe de vulnérabilité | Classe de qualité                   |
|-------------------------|-------------------------------------|
| Très faible             | Aucun point                         |
| Faible                  | 1 point d'eau d'excellente qualité  |
|                         | 1 point d'eau de bonne qualité      |
|                         | 1 point d'eau de mauvaise qualité   |
| Moyenne                 | 4 points d'eau d'excellente qualité |
|                         | 36 points d'eau de bonne qualité    |
|                         | 18 points d'eau de mauvaise qualité |
| Forte                   | 2 points d'eau d'excellente qualité |
|                         | 6 points d'eau de bonne qualité     |
|                         | 1 point d'eau de mauvaise qualité   |
| Très forte              | 1 point d'eau de bonne qualité      |
|                         | 1 point d'eau de mauvaise qualité   |

En s'appuyant sur cette répartition, il est noté que seulement 40 points (sur les 72) ont leur classe de qualité coïncidant avec les degrés de vulnérabilité correspondants, soit un taux de coïncidence de 55,16%. Ce taux permet de valider le modèle AHP –DRASTIC réalisé.

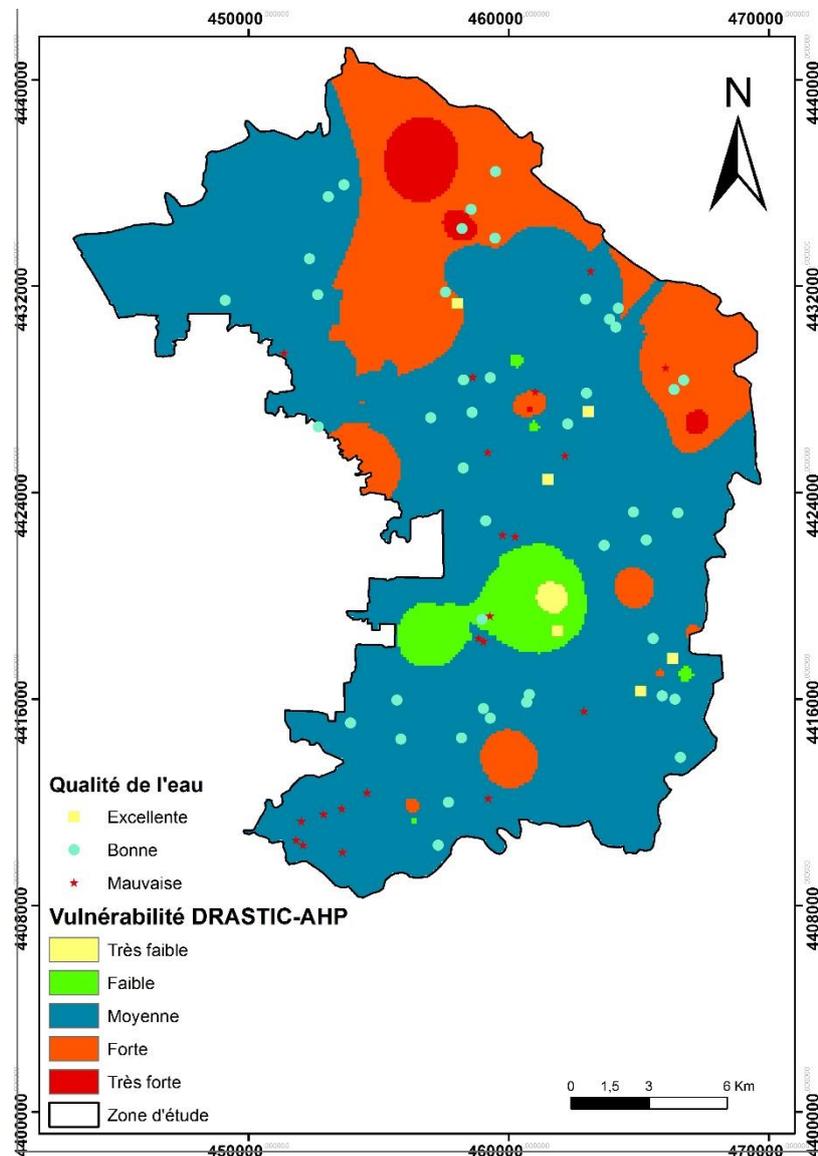


Figure 28 : Répartition des classes de qualité sur le modèle de vulnérabilité DRASTIC -AHP

### III.2.3.3. Méthode AHP - AHP

Sur le modèle AHP – AHP (figure 29), la surface de la classe « très faible » est minuscule égale à 0,10%. Cette classe est représentée par un petit îlot situé au Nord de la zone d'étude. La classe « faible » situé au Nord et au centre est un peu plus grande et couvre 1,85% de la

superficie totale. La classe « moyenne » est la plus grande avec un pourcentage de 65,31%. La classe « forte » une bande qui s'étend du Nord, au Sud Est en couvrant tout l'Est du district de Chaoyang. Sa superficie est de 29,30%. La dernière classe est sporadique, représentée par des îlots au Nord, Est et Sud-Est. Elle couvre une superficie de 3,44%.

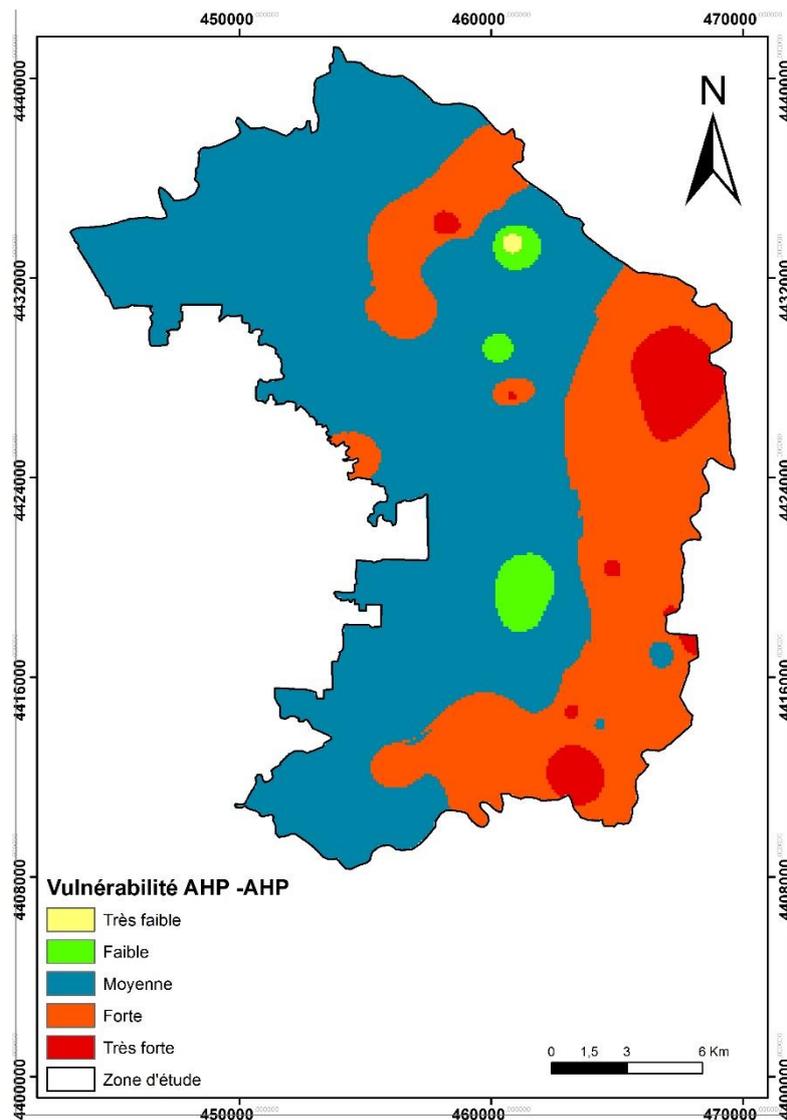


Figure 29: Répartition des classes de vulnérabilité obtenues par le modèle AHP – AHP

La figure 30 est une carte montrant la répartition de la qualité de l'eau au niveau du modèle AHP – AHP. L'analyse de la carte précédente permet d'obtenir le tableau 27 qui suit :

Tableau 27 : Répartition des classes de qualité en fonction des classes de vulnérabilité de la méthode AHP – AHP

| Classe de vulnérabilité | Classe de qualité   |
|-------------------------|---|
| Très faible             | Aucun point   |
| Faible                  | 1 point d'eau d'excellente qualité                                      |
| Moyenne                 | 2 points d'eau d'excellente qualité                                     |
|                         | 32 points d'eau de bonne qualité<br>18 points d'eau de mauvaise qualité |
| Forte                   | 3 points d'eau d'excellente qualité                                     |
|                         | 9 points d'eau de bonne qualité   |
|                         | 3 points d'eau de mauvaise qualité                                      |
| Très forte              | 3 points d'eau de bonne qualité   |
|                         | 1 point d'eau de mauvaise qualité                                       |

En s'appuyant sur cette répartition, il est noté que seulement 36 points (sur les 72) ont leur classe de qualité coïncidant avec les degrés de vulnérabilité correspondants, soit un taux de coïncidence de 50%. Ce taux permet de valider le modèle AHP – AHP réalisé.

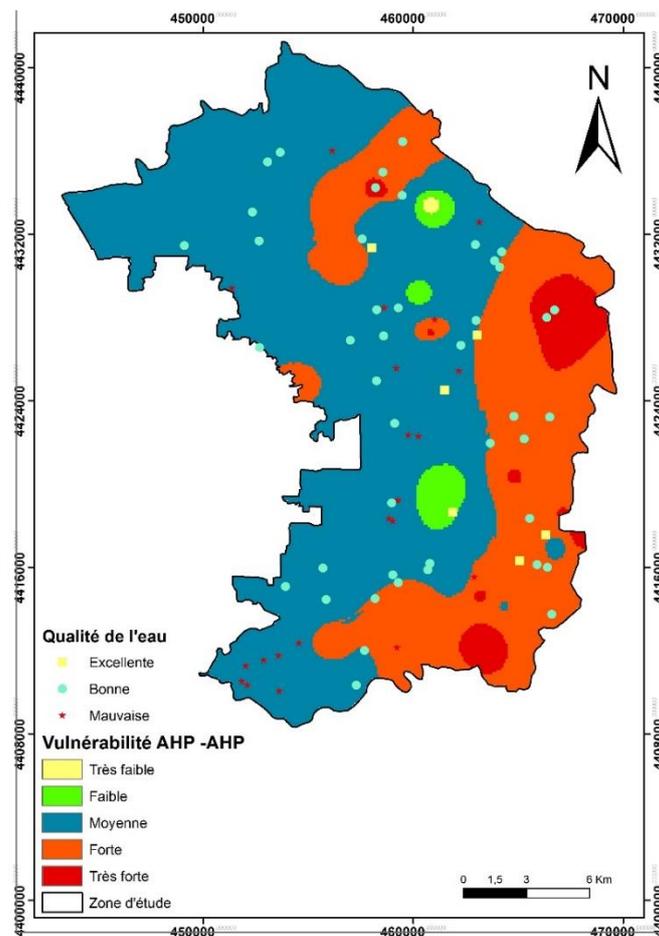


Figure 30 : Répartition des classes de qualité sur le modèle de vulnérabilité AHP-AHP

### III.2.4 Analyse comparée des méthodes

Le tableau 28 donne les pourcentages de surface occupée par chaque classe

Tableau 28: Tableau récapitulatif des pourcentages de surface par classe et par méthode

| Classe de vulnérabilité | Pourcentage de surface par classe et par méthode en % |             |             |         |
|-------------------------|---|-------------|-------------|---------|
|                         | DRASTIC   | AHP-DRASTIC | DRASTIC-AHP | AHP-AHP |
| Très faible             | 0   | 0,19        | 0,26        | 0,1     |
| Faible                  | 79,82   | 8,63        | 4,09        | 1,85    |
| Moyenne                 | 20,18   | 71,34       | 74,16       | 65,31   |
| Forte                   | 0   | 18,12       | 19,60       | 29,3    |
| Très forte              | 0   | 1,65        | 1,89        | 3,44    |

Il ressort que les méthodes AHP-DRASTIC, DRASTIC-AHP, AHP-AHP présentent une vulnérabilité concentrée sur la classe « moyenne » avec 71,3%, 74,16% et 65,31% ; mais la méthode DRASTIC est plus concentrée sur la classe « faible » avec 79,82%. La classe « très faible » n'est pas représentée par la méthode DRASTIC alors qu'elle est faiblement représentée par les méthodes dérivées. Les classes « forte » et « très forte » ne sont pas présentées par la méthode DRASTIC mais sont faiblement présentées par les méthodes dérivées. En somme, la méthode DRASTIC a tendance à minimiser la vulnérabilité des eaux souterraines à la vulnérabilité par rapport aux méthodes AHP-DRASTIC, DRASTIC-AHP, AHP-AHP.

Les résultats du croisement (soustraction entre les indices de vulnérabilité) des cartes de vulnérabilité deux à deux sont résumés dans le tableau 29.

Tableau 29 : Pourcentage des surfaces des différences

| Différence | Pourcentage des surfaces des différences |        |        |         |         |         |
|------------|--|--------|--------|---------|---------|---------|
|            | D - AD                                   | D - DA | D - AA | AD - DA | AA - AD | AA - DA |
| -2         | 11,85                                    | 29,75  | 32,91  | -       | -       | -       |
| -1         | 84,19                                    | 68,44  | 66,28  | 45,11   | -       | 29      |
| 0          | 3,35                                     | 1,8    | 0,81   | 20,58   | 22,44   | 13,19   |
| 1          | -  | -      | -      | 33,65   | 77,56   | 54,80   |
| 2          | -  | -      | -      | -       | -       | 3,01    |

Avec D = DRASTIC, AD = AHP - DRASTIC, DA = DRASTIC - AHP, AA = AHP - AHP.

Ces chiffres confirment le fait que la méthode DRASTIC sous-estime l'évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines du district de Chaoyang. Les ressemblances (valeur de différence 0) entre les méthodes dérivées ne sont pas vraiment grandes, inférieures à 25%.

La classe AHP - DRASTIC a tendance à légèrement surévaluer la vulnérabilité par rapport à la méthode DRASTIC - AHP (45,11%). Dans l'ensemble, la méthode AHP - AHP surestime la vulnérabilité des eaux à la pollution par rapport aux méthodes AHP - DRASTIC et DRASTIC-AHP avec des pourcentages de 77,56% et 57,81%.

Dans le cadre de cette étude, il est recherché la méthode qui pourra non seulement évaluer la vulnérabilité des eaux mais aussi permettre de prendre des mesures de protection préventives contre la pollution. Il est décidé de prendre le modèle AHP - AHP comme référant car il surévalue la vulnérabilité et permettra de sécuriser les ressources en eau en empêchant la dégradation de leur qualité.



#### III.2.4.1. Discussions

Un bon nombre des paramètres utilisés comme la recharge, la zone d'impact ou la topographie sont approximatifs ou produit par extrapolation. Ces derniers peuvent expliquer des erreurs pendant le processus d'évaluation lors de la validation utilisant les valeurs des résultats des analyses effectuées sur les eaux souterraines. Car ces valeurs ne seront fiables qu'à l'intérieur des intervalles délimitées par les données ponctuelles (Jourda et al, 2006).

La validation de la carte de vulnérabilité aurait été plus représentative, si les points de mesure pour l'évaluation de la qualité des eaux étaient en plus grand nombre et mieux repartis dans tout le district. De plus, malgré sa facilité de mise en œuvre et de report cartographique grâce au SIG, des difficultés apparaissent dans son élaboration de la méthode DRASTIC à savoir :

- L'attribution des notes des sept paramètres DRASTIC ;
- La fiabilité et la disponibilité de certaines données puisqu'il a fallu quelques fois poser des hypothèses ;
- Le nombre important de paramètres pris en compte dans la méthode. Il est possible qu'un paramètre important soit masqué par les autres.

L'étude de la vulnérabilité à la pollution par les méthodes DRASTIC et les méthodes dérivées a permis de déceler cinq classes de vulnérabilité très faible, faible, moyenne, forte et très forte. La vulnérabilité moyenne est la plus dominante dans le district.

L'analyse des cartes de vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la plaine a révélé que le degré de vulnérabilité croît avec la perméabilité du sol, la recharge nette et le type de matériau dominant des aquifères. Les secteurs à faible vulnérabilité se trouvent au niveau des zones tampons, c'est-à-dire là où l'argile est présente et où la recharge nette est faible.

Les cartes obtenues sont des cartes d'aide à la décision. Comme dans tout autre produit résultant de la manipulation ou traitement de jeux de données, ces cartes peuvent contenir des erreurs dont la source provient depuis l'acquisition de données, en passant par leur traitement ou du fait d'une couverture spatiale assez limitée des données. Pour une éventuelle exploitation de telles cartes, il est donc important que l'information sur les données, leur



mode de traitement et la qualité des données soient rendus disponibles. Dans tous les cas, ces méthodes de vulnérabilités intrinsèques permettent de se faire une idée assez précise des zones sensibles d'une région donnée en vue de prendre des dispositions de protection nécessaires.

## IV. Conclusions et recommandations

Cette étude portant sur la caractérisation des sources de pollution de la nappe et de sa vulnérabilité face à celle-ci a permis d'aboutir aux conclusions suivantes :

- **L'identification et la caractérisation des sources de pollution des eaux souterraines du district de Chaoyang**

Les différentes sources potentielles de pollution des eaux souterraines du district de Chaoyang ont été identifiées. Il s'agit de la pollution par infiltration des eaux de surface contaminées, la pollution chimique et pétrolière, la pollution par les pesticides agricoles et la pollution par les déchets solides municipaux. Les analyses des prélèvements effectuées au niveau des sites identifiés révèlent que la qualité de ces eaux est à majorité bonne (62,5%) dans le district. Les lieux où l'eau est de mauvaise qualité (30,56%) sont des sites industriels et des zones de forte agglomération.

- **La cartographie de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines du district de Chaoyang par différentes méthodes**

Elle a permis de dresser le portrait de la défense naturelle de l'aquifère de Chaoyang contre les pollutions à partir des méthodes DRASTIC, AHP-DRASTIC, DRASTIC-AHP et AHP-AHP. Cette cartographie révèle que les méthodes dérivées, surtout la méthode AHP - AHP, fournissent de meilleurs résultats d'évaluation de la vulnérabilité par rapport à la méthode DRASTIC. Leur application dans le cas du district de Chaoyang a montré que la nappe est vulnérable à la pollution dans son ensemble. Cette vulnérabilité est accentuée au niveau des zones de forte conductivité hydraulique. Les zones les plus favorables à la recharge sont aussi les plus vulnérables. La méthode DRASTIC sous-estime la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines du district de Chaoyang. La classe de vulnérabilité dominante dans le cadre d'étude est celle de classe « moyenne » avec des pourcentages de surfaces de 71,34% pour la méthode AHP – DRASTIC, 74,16% pour la DRASTIC-AHP et 65,31% pour la méthode AHP-AHP. Ce modèle est choisi comme base pour la prise de décision en ce qui concerne la protection des ressources en eau souterraine du district.



## **Recommandations**

Au terme de cette étude, nous faisons les recommandations suivantes :

Pour une meilleure gestion des sites d'enfouissement des déchets solides municipaux, il faut réglementer la collecte et unifier les procédures de leur enfouissement. Pour les mesures de contrôle de la pollution, il est nécessaire de :

- Mettre en place une barrière au fond de la décharge qui va constituer une barrière hydraulique pour les lixiviats ;
- Utiliser une technologie de reflux de lixiviat. Le reflux de lixiviat se réfère directement au lixiviat non traité ou légèrement traité de la couche d'ordures. En utilisant un "filtre biologique", on observe une série d'effets physiques, chimiques et biologiques qui réduisent la concentration de polluants dans le lixiviat. Il permettra la décomposition des composants organiques en des éléments nutritifs nécessaires à l'amélioration de l'activité microbienne, favorisant la purification de la qualité du lixiviat.

Dans le choix des méthodes de traitement des eaux usées, il est primordial d'examiner les caractéristiques des eaux usées et les exigences de traitement afin de répondre aux différents critères de qualité de l'eau usée réutilisée. On peut également envisager de combiner les méthodes de traitement physique (filtration et adsorption), chimique (neutralisation ou oxydation avancée) et biologique (boues activées, biofilm) tout en tenant compte du coût, de leur efficacité et de leur durabilité.

Il faudrait mettre en place des zones de protection en fonction de la vulnérabilité exprimée par la méthode AHP-AHP.



## BIBLIOGRAPHIE

Aller, L, Bennet, T., Lehr, J. H., Petty, R. J., and Hackett, G. 1987. "DRASTIC: A Standardized System for Evaluating Ground Water Pollution Potential Using Hydrogeologic Settings." US EPA Report 600/2-87/035. <http://www.epa.gov/nscep>.

Aminreza N., Biswasheet P., and Mohsen D. 2014. "Groundwater Vulnerability Assessment Using an Improved DRASTIC Method in GIS." *Elsevier, Resources conservation and recycling*, 86: 74–86.

District de Chaoyang. 2014. "Rapport statistique sur la population du district de Chaoyang."

Eblissem R. C., Nadia T., Samir B., and Hamed B. D. 2008. "'Spatial analyst' pour le calcul et la cartographie de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution selon la méthode DRASTIC. Application sur la nappe de Gabès Nord." In *session environnement et eau*. Versailles France: ESRI France. <http://www.esrifrance.fr/sig2008/Drastic.htm>.

Habib S., Nouha M., Moncef Z., and Hamed B. D. 2009. "Gestion quantitative et qualitative des ressources en eaux dans la région de Sidi Bouzid (Tunisie centrale) à l'aide d'un SIG : Etude de la recharge induite des nappes et leur vulnérabilité à la pollution." ESRI France.

Hao J. 2013. "Research on groundwater vulnerability assessment in Chaoyang district beijing city." Beijing , P.R.China: Beijing University of Technology.

Jourda J.P., Kouamé K., Adja M.G., Deh S.K., Anani A.T., Effini A.T., and Biemi J. 2007. "Evaluation du degré de protection des eaux souterraines : vulnérabilité à la pollution de la nappe de Bonoua (Sud - Est de la Côte d'Ivoire) par la méthode Drastic." In *session environnement et eau*. Versailles France: ESRI France. <https://www.esrifrance.fr/sig2007/cocody-jourda.htm>.

Lan S. S. 2016. "Investigation et étude des pollutions dans le district de Chaoyang." Etude annuelle. Chine: Beijing University of Technology.

Ministry of Water Resources, People's Republic of China. 1993. "GB/T14848-93 Quality standard of groundwater."

Saaty TL. 1980. "The Analytic Hierarchy Process : Planning, Priority Setting, Resource Allocation."

Simboro A. 2015. "Gestion quantitative et qualitative des ressources en eau dans la plaine alluviale de Karfiguéla à l'aide d'un SIG : Etude de la recharge induite de la nappe et sa



vulnérabilité à la pollution.” Mémoire, BURKINA FASO: Institut International de l’Eau et de l’Environnement (2iE).

Valérie M. 2000. “Etude comparartive des méthodes d’évaluation de la vulnérabilité intrisèque à la pollution: application aux aquifères granulaires du Piémont, Laurentien.” Mémoire, Canada: Université du Québec.

Vrba, J, and Zaporozec, A. 1994. *Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability*. Vol. 16. AIH.

Wang H. 2012. “Applied Research of Technology and Method Systems of Water Resources Management in Northern Cities.”

Zhang Y. 2014. “Water Resource Environment in Beijing.”



# ANNEXES

---

## ANNEXE 1 : PROFILS HYDROGEOLOGIQUES DANS LE DISTRICT DE CHAOYANG

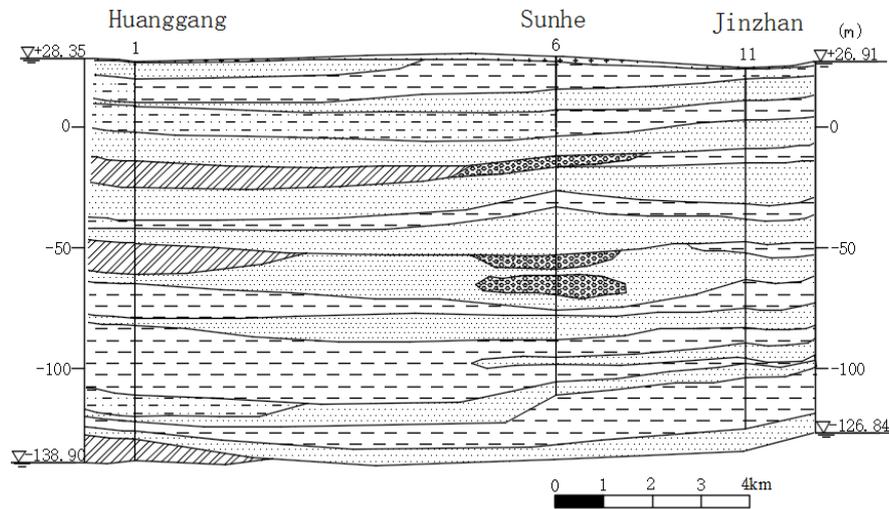


Figure 31 : Profil hydrogéologique n°1 direction Est Ouest

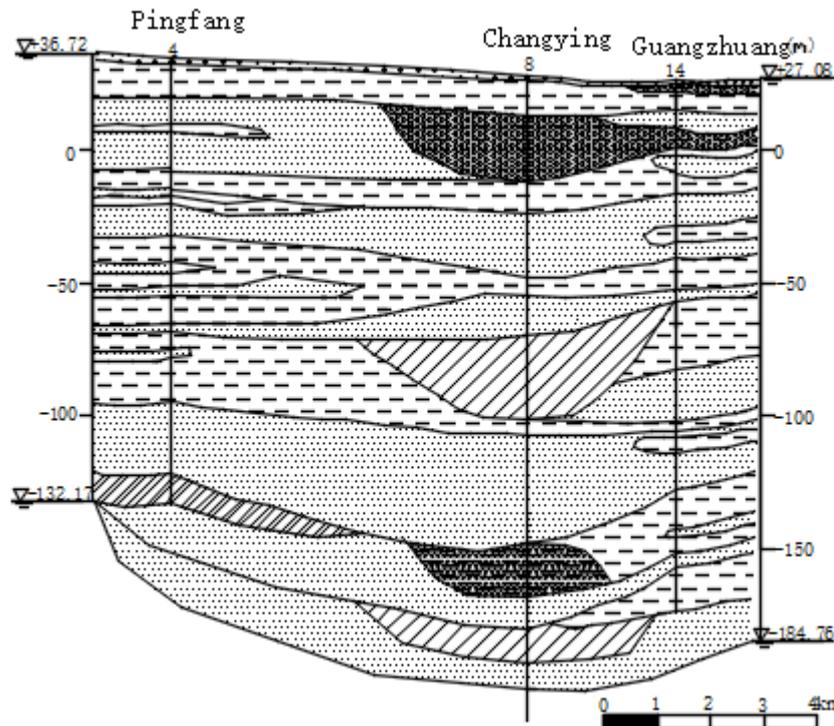


Figure 32 : Profil hydrogéologique n°2 direction Est Ouest

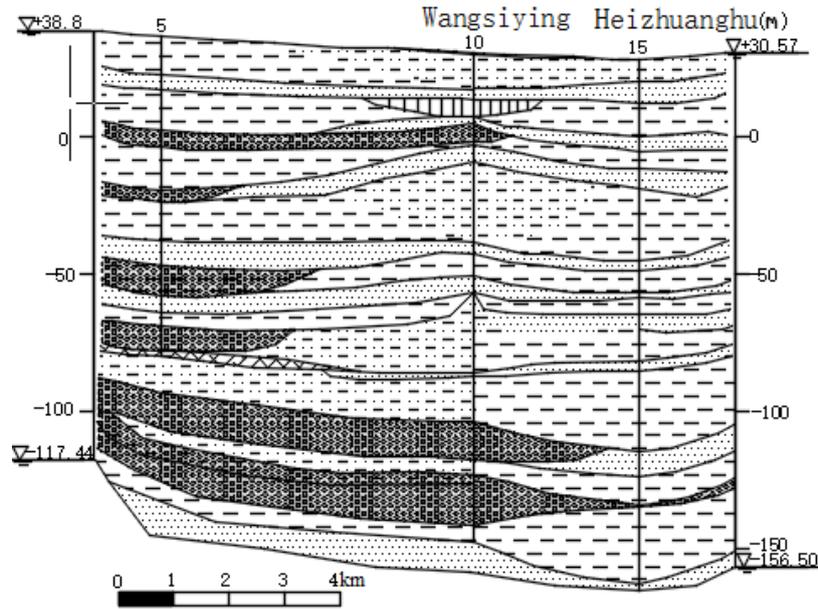


Figure 33 : Profil hydrogéologique n°3 direction Est Ouest

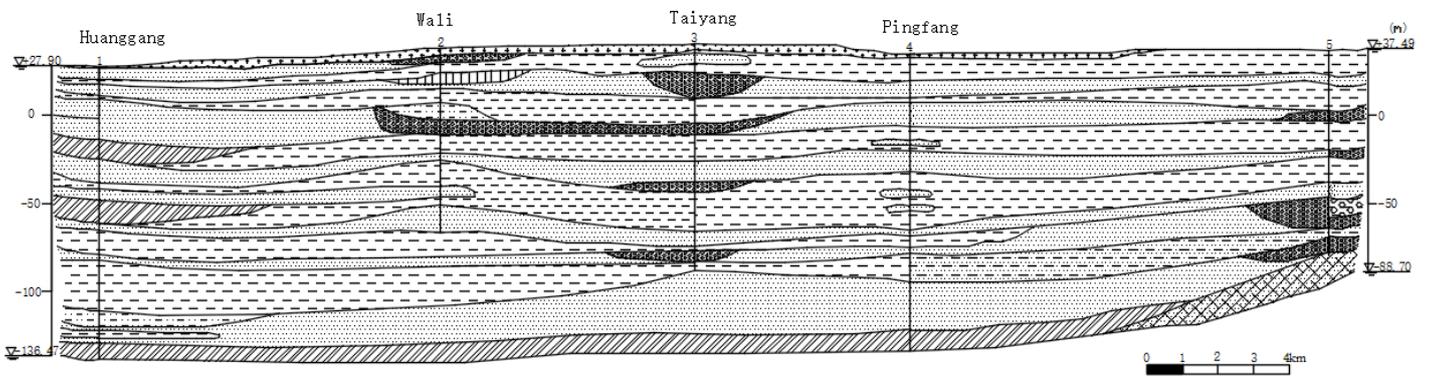


Figure 34 : Profil hydrogéologique n°4 direction Est Ouest

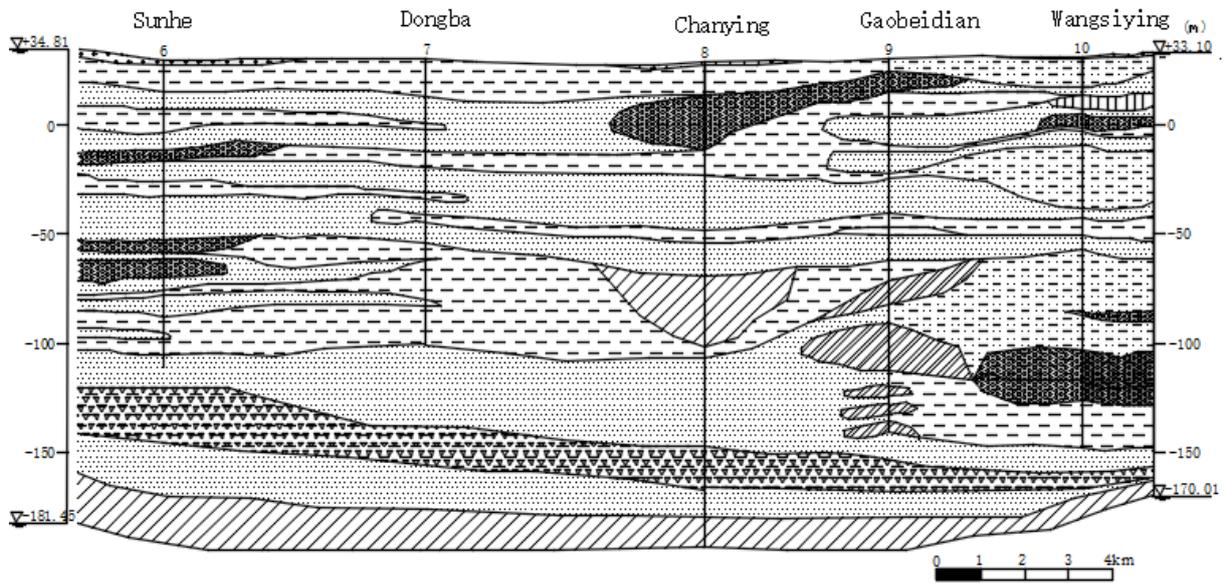


Figure 35 : Profil hydrogéologique n°1 direction Nord Sud

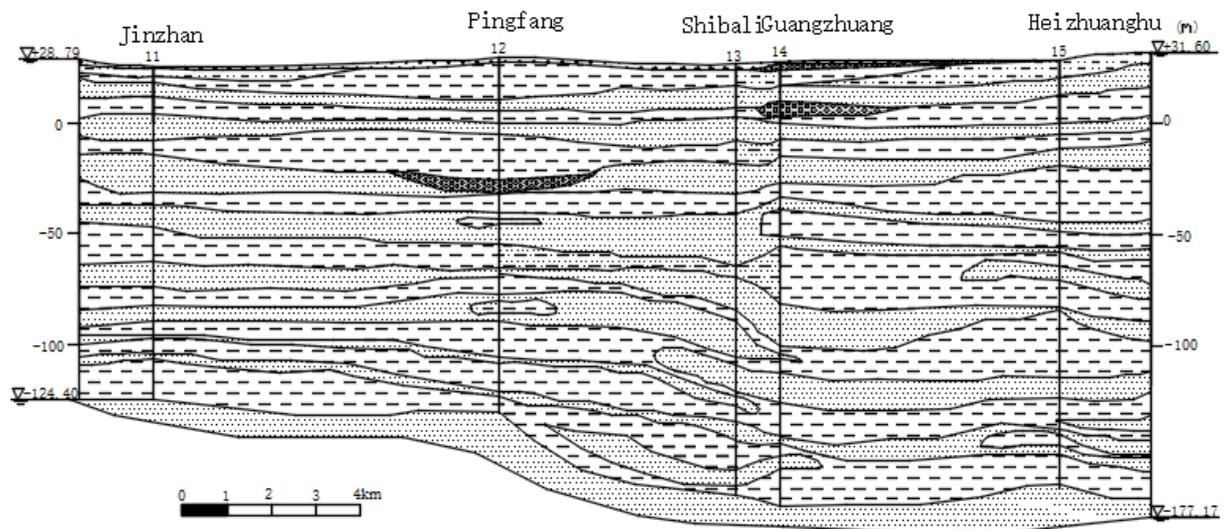


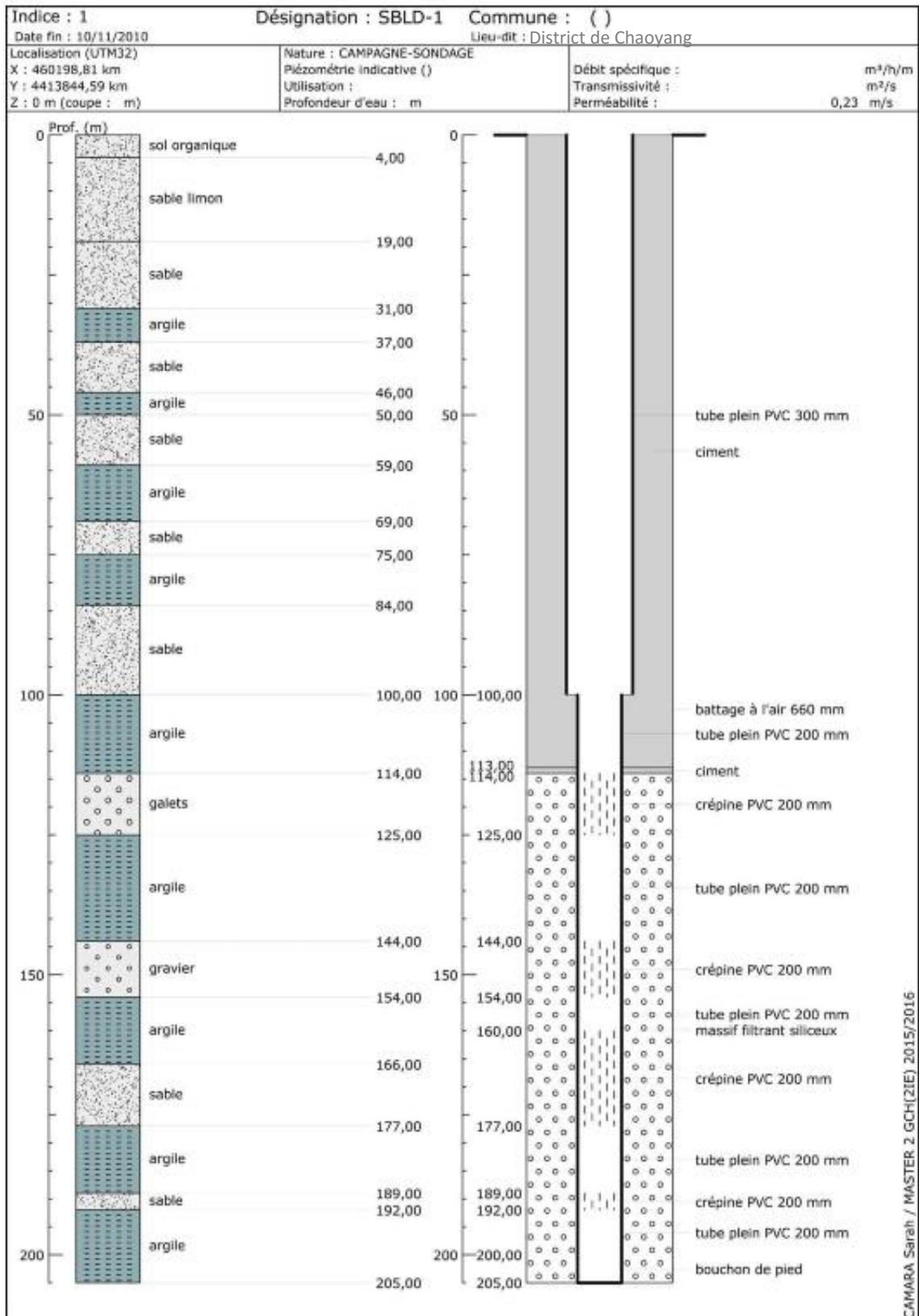
Figure 36 : Profil hydrogéologique n°2 direction Nord Sud

### Légende

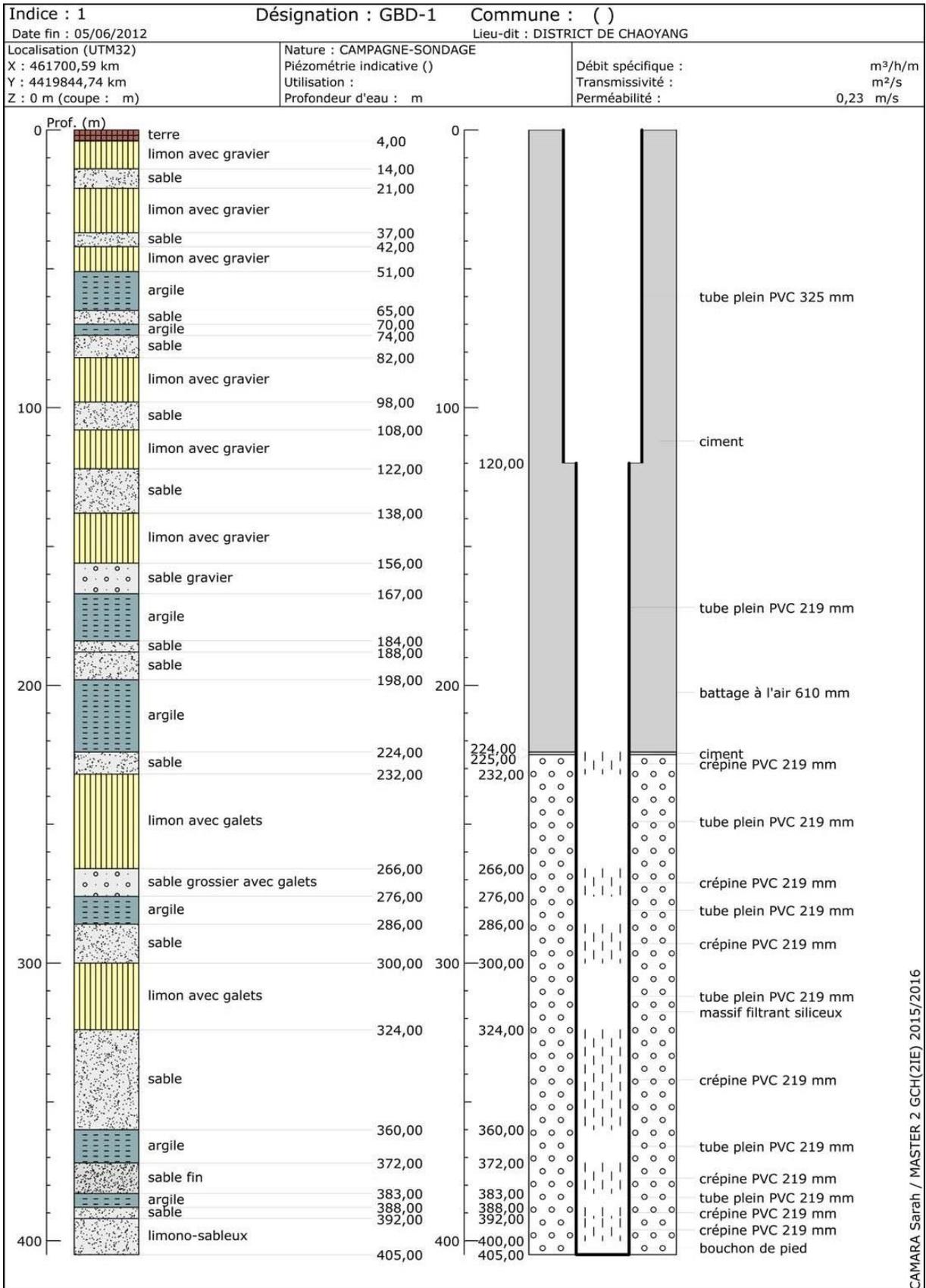
|  |                  |  |        |  |       |  |                  |  |                |
|--|------------------|--|--------|--|-------|--|------------------|--|----------------|
|  | Sol organique    |  | Argile |  | Sable |  | Gravier          |  | Sable grossier |
|  | Numéro de forage |  | Loam   |  | Loess |  | Argile élastique |  | Calcaire       |



# ANNEXE 2 : PRESENTATION DE LOG DE FORAGE



CAMARA Sarah / MASTER 2 GCH(21E) 2015/2016



CAMARA Sarah / MASTER 2 GCH(2IE) 2015/2016

## ANNEXE 3 : REFERENCES DES POINTS D'ECHANTILLONNAGE

Tableau 30 : Références des points d'échantillonnage

| Identifiant | Longitude  | Latitude   | Nature du lieu   | Identifiant | Longitude  | Latitude   | Nature du lieu   |
|-------------|------------|------------|------------------|-------------|------------|------------|------------------|
| SBLD-05     | 454567,08  | 4412363,27 | Lieu public      | WSY-05      | 458192,607 | 4414501,64 | Domaine agricole |
| JT-03       | 458624,945 | 4428471,48 | Hôpital          | LGY-02      | 452666,171 | 4431683,16 | Lieu public      |
| XHM-01      | 453625,864 | 4410055,66 | Station d'eau    | WSY-03      | 460695,361 | 4415876,32 | Lieu public      |
| DGZ-01      | 462903,717 | 4415526,01 | Lieu public      | WSY-01      | 459030,595 | 4415638,31 | Lieu public      |
| JZ-07       | 466028,717 | 4428835,81 | Station d'eau    | DF-01       | 458249,816 | 4424957,31 | Lieu public      |
| JZ-06       | 463152,583 | 4432581,3  | Station d'eau    | JZ-05       | 466738,386 | 4428370,02 | Hôpital          |
| DB-07       | 461018,259 | 4427903,66 | centre piscicole | TYG-01      | 452681,787 | 4426562,9  | Lieu public      |
| DT-01       | 451371,005 | 4429408,84 | Station d'eau    | HZH-01      | 465069,952 | 4416317,72 | Lieu public      |
| SBLD-01     | 459225,901 | 4412151,97 | Lieu public      | NMF-02      | 455863,005 | 4414453,04 | Lieu public      |
| JZ-01       | 462957,635 | 4431502,71 | Station d'eau    | HZH-02      | 465900,797 | 4416128,91 | Lieu public      |
| PF-03       | 460253,493 | 4422294,04 | Station d'eau    | LGY-03      | 452342,867 | 4433073,19 | Lac              |
| JZ-02       | 463878,85  | 4430727,18 | Lieu public      | GZ-02       | 466311,151 | 4417576,72 | Lieu public      |
| SH-04       | 459497,864 | 4436455,42 | Terrains de golf | PF-01       | 459117,109 | 4422916,92 | Lieu public      |
| SH-03       | 459484,051 | 4433864,57 | Terrains de golf | HZH-03      | 466399,269 | 4416003,33 | Lieu public      |
| DB-04       | 459202,529 | 4425569,03 | Lac              | GBD-01      | 459287,304 | 4419214,78 | Lieu public      |
| DT-02       | 449107,347 | 4431459,38 | Lieu public      | GBD-02      | 459044,481 | 4418229,08 | Lieu public      |
| XHM-04      | 452105,568 | 4410342,6  | Industrie        | LGY-01      | 465286,696 | 4422176,95 | Industrie        |
| JZ-03       | 464114,567 | 4430417,63 | Lac              | JT-01       | 457002,811 | 4426907,42 | Jardin           |
| XHM-02      | 452040,021 | 4411268,32 | Station d'eau    | DB-01       | 462269,629 | 4426663,6  | rivière          |
| JZ-10       | 464212,922 | 4431157,42 | Lac              | CGZ-02      | 458023,935 | 4431343,27 | Lieu public      |
| NMF-01      | 455705,384 | 4415965,29 | Industrie        | JT-05       | 458593,843 | 4427114,51 | Jardin           |
| DB-06       | 463055,108 | 4427153,25 | Station d'eau    | SJF-01      | 461873,623 | 4418646,25 | Lieu public      |
| HZH-04      | 466603,304 | 4413750,9  | Lieu public      | GZ-01       | 465554,369 | 4418351,17 | Lieu public      |
| XHM-05      | 452897,737 | 4411540,59 | Industrie        | SH-02       | 453069,029 | 4435474,55 | Lieu public      |
| XHM-03      | 451845,142 | 4410529,3  | rivière          | CGZ-03      | 458205,882 | 4434241,63 | Lieu public      |
| DB-02       | 462168,585 | 4425430,36 | Station d'eau    | SH-01       | 453664,417 | 4435933,57 | rivière          |

| Identifiant | Longitude  | Latitude   | Nature du lieu | Identifiant | Longitude  | Latitude   | Nature du lieu                 |
|-------------|------------|------------|----------------|-------------|------------|------------|--------------------------------|
| PF-02       | 459778,947 | 4422358,22 | Hôpital        | CGZ-01      | 457575,751 | 4431777,57 | Lieu public                    |
| JZ-04       | 466357,16  | 4428001,58 | Station d'eau  | JT-04       | 459289,226 | 4428467,9  | Lieu public                    |
| WSY-04      | 459290,031 | 4415266,8  | Lieu public    | JT-02       | 458268,573 | 4428380,89 | Industrie                      |
| GBD-04      | 458977,851 | 4419093,06 | Lieu public    | CY-01       | 463671,09  | 4421968,57 | lac                            |
| SBLD-04     | 453588,583 | 4411752,27 | Lieu public    | CGZ-04      | 458565,513 | 4434979,92 | Lieu public                    |
| GBD-03      | 458855,096 | 4418353,48 | Station d'eau  | JZ-09       | 462987,37  | 4427862,99 | Terrains de golf               |
| SBLD-03     | 457289,969 | 4410342,78 | Industrie      | DB-03       | 461499,368 | 4424508,4  | Lieu public                    |
| SBLD-02     | 457679,668 | 4412006,15 | Industrie      | JZ-GAT-1    | 466502,233 | 4423220,19 | Usine de traitement de déchets |
| NMF-03      | 453917,744 | 4415081,39 | Industrie      | SH-05       | 456153,575 | 4436011,32 | rivière                        |
| WSY-02      | 460791,997 | 4416184,25 | Station d'eau  | DB-05       | 464793,059 | 4423258,74 | Lieu public                    |

## ANNEXE 4 : RESULTATS DE LA METHODE F

Tableau 31 : Valeurs de F calculées

| Identifiant | Longitude  | Latitude   | Lieux d'échantillonnage | Valeur de F | Qualité de l'eau |
|-------------|------------|------------|-------------------------|-------------|------------------|
| XHM-02      | 452040,021 | 4411268,32 | Station d'eau           | 7,12        | Mauvaise         |
| XHM-04      | 452105,568 | 4410342,6  | Industrie               | 7,11        | Mauvaise         |
| XHM-03      | 451845,142 | 4410529,3  | rivière                 | 7,11        | Mauvaise         |
| XHM-05      | 452897,737 | 4411540,59 | Industrie               | 7,10        | Mauvaise         |
| SBLD-01     | 459225,901 | 4412151,97 | Lieu public             | 7,09        | Mauvaise         |
| GBD-02      | 459044,481 | 4418229,08 | Lieu public             | 7,09        | Mauvaise         |
| DGZ-01      | 462903,717 | 4415526,01 | Lieu public             | 7,08        | Mauvaise         |
| SH-05       | 456153,575 | 4436011,32 | rivière                 | 7,08        | Mauvaise         |
| SBLD-05     | 454567,08  | 4412363,27 | Lieu public             | 4,29        | Mauvaise         |
| XHM-01      | 453625,864 | 4410055,66 | Station d'eau           | 4,29        | Mauvaise         |
| PF-03       | 460253,493 | 4422294,04 | Station d'eau           | 4,28        | Mauvaise         |
| DB-07       | 461018,259 | 4427903,66 | centre piscicole        | 4,27        | Mauvaise         |
| DB-02       | 462168,585 | 4425430,36 | Station d'eau           | 4,27        | Mauvaise         |
| DB-04       | 459202,529 | 4425569,03 | Lac                     | 4,26        | Mauvaise         |
| PF-02       | 459778,947 | 4422358,22 | Hôpital                 | 4,26        | Mauvaise         |
| SBLD-04     | 453588,583 | 4411752,27 | Lieu public             | 4,26        | Mauvaise         |
| GBD-03      | 458855,096 | 4418353,48 | Station d'eau           | 4,26        | Mauvaise         |
| DT-01       | 451371,005 | 4429408,84 | Station d'eau           | 4,26        | Mauvaise         |
| GBD-01      | 459287,304 | 4419214,78 | Lieu public             | 4,25        | Mauvaise         |
| JZ-07       | 466028,717 | 4428835,81 | Station d'eau           | 4,25        | Mauvaise         |
| JZ-06       | 463152,583 | 4432581,3  | Station d'eau           | 4,25        | Mauvaise         |
| JT-03       | 458624,945 | 4428471,48 | Hôpital                 | 4,25        | Mauvaise         |
| NMF-01      | 455705,384 | 4415965,29 | Industrie               | 2,15        | Bonne            |
| JZ-04       | 466357,16  | 4428001,58 | Station d'eau           | 2,14        | Bonne            |
| WSY-04      | 459290,031 | 4415266,8  | Lieu public             | 2,14        | Bonne            |
| GBD-04      | 458977,851 | 4419093,06 | Lieu public             | 2,14        | Bonne            |
| SBLD-02     | 457679,668 | 4412006,15 | Industrie               | 2,14        | Bonne            |
| JZ-05       | 466738,386 | 4428370,02 | Hôpital                 | 2,14        | Bonne            |
| SBLD-03     | 457289,969 | 4410342,78 | Industrie               | 2,14        | Bonne            |
| NMF-03      | 453917,744 | 4415081,39 | Industrie               | 2,14        | Bonne            |
| WSY-01      | 459030,595 | 4415638,31 | Lieu public             | 2,14        | Bonne            |
| SH-04       | 459497,864 | 4436455,42 | Terrains de golf        | 2,13        | Bonne            |
| WSY-02      | 460791,997 | 4416184,25 | Station d'eau           | 2,13        | Bonne            |
| WSY-05      | 458192,607 | 4414501,64 | Domaine                 | 2,13        | Bonne            |

| Identifiant | Longitude  | Latitude   | Lieux d'échantillonnage        | Valeur de F | Qualité de l'eau |
|-------------|------------|------------|--------------------------------|-------------|------------------|
|             |            |            | agricole                       |             |                  |
| LGY-02      | 452666,171 | 4431683,16 | Lieu public                    | 2,13        | Bonne            |
| WSY-03      | 460695,361 | 4415876,32 | Lieu public                    | 2,13        | Bonne            |
| DF-01       | 458249,816 | 4424957,31 | Lieu public                    | 2,13        | Bonne            |
| TYG-01      | 452681,787 | 4426562,9  | Lieu public                    | 2,13        | Bonne            |
| JT-05       | 458593,843 | 4427114,51 | Jardin                         | 2,13        | Bonne            |
| JZ-01       | 462957,635 | 4431502,71 | Station d'eau                  | 2,13        | Bonne            |
| JZ-02       | 463878,85  | 4430727,18 | Lieu public                    | 2,13        | Bonne            |
| JZ-03       | 464114,567 | 4430417,63 | Lac                            | 2,13        | Bonne            |
| HZH-02      | 465900,797 | 4416128,91 | Lieu public                    | 2,13        | Bonne            |
| LGY-03      | 452342,867 | 4433073,19 | Lac                            | 2,13        | Bonne            |
| PF-01       | 459117,109 | 4422916,92 | Lieu public                    | 2,13        | Bonne            |
| HZH-03      | 466399,269 | 4416003,33 | Lieu public                    | 2,13        | Bonne            |
| LGY-01      | 465286,696 | 4422176,95 | Industrie                      | 2,13        | Bonne            |
| GZ-01       | 465554,369 | 4418351,17 | Lieu public                    | 2,13        | Bonne            |
| CGZ-01      | 457575,751 | 4431777,57 | Lieu public                    | 2,13        | Bonne            |
| JT-04       | 459289,226 | 4428467,9  | Lieu public                    | 2,13        | Bonne            |
| DB-05       | 464793,059 | 4423258,74 | Lieu public                    | 2,13        | Bonne            |
| DT-02       | 449107,347 | 4431459,38 | Lieu public                    | 2,13        | Bonne            |
| HZH-04      | 466603,304 | 4413750,9  | Lieu public                    | 2,13        | Bonne            |
| JT-02       | 458268,573 | 4428380,89 | Industrie                      | 2,13        | Bonne            |
| SH-03       | 459484,051 | 4433864,57 | Terrains de golf               | 2,12        | Bonne            |
| NMF-02      | 455863,005 | 4414453,04 | Lieu public                    | 2,12        | Bonne            |
| JT-01       | 457002,811 | 4426907,42 | Jardin                         | 2,12        | Bonne            |
| DB-01       | 462269,629 | 4426663,6  | rivière                        | 2,12        | Bonne            |
| SH-02       | 453069,029 | 4435474,55 | Lieu public                    | 2,12        | Bonne            |
| JZ-GAT-1    | 466502,233 | 4423220,19 | Usine de traitement de déchets | 2,12        | Bonne            |
| JZ-10       | 464212,922 | 4431157,42 | Lac                            | 2,12        | Bonne            |
| CGZ-03      | 458205,882 | 4434241,63 | Lieu public                    | 2,12        | Bonne            |
| SH-01       | 453664,417 | 4435933,57 | rivière                        | 2,12        | Bonne            |
| CY-01       | 463671,09  | 4421968,57 | lac                            | 2,12        | Bonne            |
| JZ-09       | 462987,37  | 4427862,99 | Terrains de golf               | 2,12        | Bonne            |
| CGZ-04      | 458565,513 | 4434979,92 | Lieu public                    | 2,12        | Bonne            |
| HZH-01      | 465069,952 | 4416317,72 | Lieu public                    | 0,73        | Très bonne       |
| GZ-02       | 466311,151 | 4417576,72 | Lieu public                    | 0,72        | Très bonne       |
| SJF-01      | 461873,623 | 4418646,25 | Lieu public                    | 0,72        | Très bonne       |
| DB-06       | 463055,108 | 4427153,25 | Station d'eau                  | 0,71        | Très bonne       |
| DB-03       | 461499,368 | 4424508,4  | Lieu public                    | 0,71        | Très bonne       |
| CGZ-02      | 458023,935 | 4431343,27 | Lieu public                    | 0,71        | Très bonne       |



## ANNEXE 5 : DETAILS DE CALCUL DE LA METHODE DRASTIC

Tableau 32 : Détails de calcul méthode DRASTIC

| Identifiant | longitude (UTM) | Latitude (UTM) | Profondeur de l'eau D (m) | côte | Recharge nette R (mm) | côte | Matériaux de l'aquifère A | côte | Type de sol S       | côte | Topographie T (m) | côte | Impact de la zone vadose  | côte | Conductivité hydraulique (m/jr) | côte | Indice DRASTIC (ID) | ID en % |
|-------------|-----------------|----------------|---------------------------|------|-----------------------|------|---------------------------|------|---------------------|------|-------------------|------|---------------------------|------|---------------------------------|------|---------------------|---------|
| SH-1        | 460206,896      | 4435022,275    | 82                        | 1    | 183,755               | 8    | sable et gravier          | 8    | argile              | 3    | 33,4              | 10   | sable, gravier avec limon | 6    | 14                              | 4    | 119                 | 47,29   |
| SH-2        | 460731,597      | 4436204,667    | 75                        | 1    | 183,755               | 8    | sable et gravier          | 8    | Limon sableux       | 4    | 27,4              | 10   | sable                     | 6    | 14                              | 4    | 121                 | 48,28   |
| LGY-1       | 458568,035      | 4433163,572    | 44                        | 1    | 183,755               | 8    | sable et gravier          | 8    | Argile limoneuse    | 3    | 36,5              | 10   | limon/argile              | 3    | 14                              | 4    | 104                 | 39,90   |
| SJF-1       | 464834,823      | 4420350,529    | 54                        | 1    | 183,755               | 8    | lits de sable             | 6    | Sable fin - limon   | 4    | 27,5              | 10   | sable                     | 6    | 33                              | 6    | 121                 | 48,28   |
| GBD-1       | 461240,021      | 4418541,94     | 90                        | 1    | 70,675                | 3    | lits de sable             | 6    | Remblai             | 5    | 31,5              | 10   | sable                     | 6    | 20                              | 4    | 97                  | 36,45   |
| GBD-2       | 461700,585      | 4419844,738    | 78                        | 1    | 70,675                | 3    | sable et gravier          | 8    | remblai             | 5    | 29,5              | 10   | limon/argile              | 3    | 20                              | 4    | 88                  | 32,02   |
| WSY-1       | 462011,417      | 4415409,963    | 37                        | 1    | 183,755               | 8    | lits de sable             | 6    | Remblai 1, argile 1 | 5    | 29,9              | 10   | limon/argile              | 3    | 20                              | 4    | 102                 | 38,92   |
| SBLD-1      | 460198,812      | 4413844,586    | 42                        | 1    | 183,755               | 8    | sable et gravier          | 8    | remblai             | 5    | 31,8              | 10   | sable                     | 6    | 20                              | 4    | 123                 | 49,26   |
| LMQ-2       | 454673,108      | 4424792,887    | 33                        | 1    | 183,755               | 8    | lits de sable             | 6    | Sable fin - limon   | 5    | 46,8              | 10   | sable, gravier avec limon | 6    | 20                              | 4    | 117                 | 46,31   |
| SJF-2       | 468032,829      | 4417654,982    | 69                        | 1    | 183,755               | 8    | Basalte                   | 9    | Remblai             | 5    | 26,3              | 10   | limon/argile              | 3    | 33                              | 6    | 117                 | 46,31   |

| Identifiant | longitude (UTM) | Latitude (UTM) | Profondeur de l'eau D (m) | côte | Recharge nette R (mm) | côte | Matériaux de l'aquifère A | côte | Type de sol S    | côte | Topographie T (m) | côte | Impact de la zone vadose  | côte | Conductivité hydraulique (m/jr) | côte | Indice DRASTIC (ID) | ID en % |
|-------------|-----------------|----------------|---------------------------|------|-----------------------|------|---------------------------|------|------------------|------|-------------------|------|---------------------------|------|---------------------------------|------|---------------------|---------|
| CGZ-1       | 458966,822      | 4434712,518    | 64                        | 1    | 183,755               | 8    | sable et gravier          | 8    | Limon sableux    | 4    | 37,2              | 10   | sable, gravier avec limon | 6    | 14                              | 4    | 121                 | 48,28   |
| CGZ-2       | 458329,949      | 4434140,244    | 62                        | 1    | 183,755               | 8    | lits de sable             | 6    | argile           | 3    | 36,3              | 10   | Basalte                   | 9    | 14                              | 4    | 128                 | 51,72   |
| ALL-1       | 450137,18       | 4436024,535    | 49                        | 1    | 183,755               | 8    | lits de sable             | 6    | Remblai          | 5    | 35,0              | 10   | schiste                   | 3    | 20                              | 4    | 102                 | 38,92   |
| HG-1        | 456552,357      | 4436708,45     | 28                        | 2    | 183,755               | 8    | lits de sable             | 6    | argile           | 3    | 37,8              | 10   | sable et gravier          | 8    | 20                              | 4    | 128                 | 51,72   |
| JT-1        | 460298,593      | 4429110,757    | 63                        | 1    | 70,675                | 3    | lits de sable             | 6    | Remblai          | 5    | 32,0              | 10   | sable                     | 6    | 14                              | 4    | 97                  | 36,45   |
| DF-1        | 459289,822      | 4425803,372    | 67                        | 1    | 70,675                | 3    | sable et gravier          | 8    | Remblai          | 5    | 33,2              | 10   | sable                     | 6    | 14                              | 4    | 103                 | 39,41   |
| JZ-1        | 466857,373      | 4428481,554    | 60                        | 1    | 183,755               | 8    | lits de sable             | 6    | Remblai          | 5    | 26,0              | 10   | sable                     | 6    | 33                              | 6    | 123                 | 49,26   |
| JZ-2        | 468472,908      | 4425187,569    | 65                        | 1    | 183,755               | 8    | lits de sable             | 6    | argile           | 3    | 24,2              | 10   | limon/argile              | 3    | 33                              | 6    | 104                 | 39,90   |
| JZ-3        | 467240,201      | 4426680,768    | 75                        | 1    | 183,755               | 8    | sable et gravier          | 8    | Remblai          | 5    | 22,1              | 10   | sable, gravier avec limon | 6    | 33                              | 6    | 129                 | 52,22   |
| LGY-2       | 452701,824      | 4436170,586    | 32                        | 1    | 183,755               | 8    | sable et gravier          | 8    | Remblai          | 5    | 33,9              | 10   | schiste                   | 3    | 20                              | 4    | 108                 | 41,87   |
| NMF-1       | 457077,303      | 4418379,876    | 62                        | 1    | 183,755               | 8    | lits de sable             | 6    | argile           | 3    | 35,0              | 10   | limon/argile              | 3    | 20                              | 4    | 98                  | 36,95   |
| JCL-1       | 460820,052      | 4433419,349    | 29                        | 2    | 183,755               | 8    | lits de sable             | 6    | Remblai          | 5    | 34,1              | 10   | limon/argile              | 3    | 14                              | 4    | 107                 | 41,38   |
| XHM-1       | 456311,783      | 4411760,551    | 74                        | 1    | 155,485               | 6    | sable et gravier          | 8    | Limon            | 4    | 34,1              | 10   | sable, gravier avec limon | 6    | 31                              | 6    | 119                 | 47,29   |
| XHM-2       | 456356,25       | 4411332,587    | 42                        | 1    | 155,485               | 6    | Sable et gravier          | 8    | Argile limoneuse | 3    | 33,6              | 10   | limon/argile              | 3    | 31                              | 6    | 102                 | 38,92   |
| CY-1        | 465189,027      | 4422688,103    | 78                        | 1    | 183,755               | 8    | Sable                     | 6    | argile           | 3    | 28,9              | 10   | limon/argile              | 3    | 33                              | 6    | 104                 | 39,90   |
| CY-2        | 467193,792      | 4421193,336    | 77                        | 1    | 183,755               | 8    | lits de sable             | 6    | argile           | 3    | 26,9              | 10   | limon/argile              | 3    | 33                              | 6    | 104                 | 39,90   |

| Identifiant | longitude (UTM) | Latitude (UTM) | Profondeur de l'eau D (m) | côte | Recharge nette R (mm) | côte | Matériaux de l'aquifère A | côte | Type de sol S    | côte | Topographie T (m) | côte | Impact de la zone vadose  | côte | Conductivité hydraulique (m/jr) | côte | Indice DRASTIC (ID) | ID en % |
|-------------|-----------------|----------------|---------------------------|------|-----------------------|------|---------------------------|------|------------------|------|-------------------|------|---------------------------|------|---------------------------------|------|---------------------|---------|
| GZ-1        | 467305,193      | 4418632,06     | 70                        | 1    | 183,755               | 8    | lits de sable             | 6    | Remblai          | 5    | 26,8              | 10   | sable                     | 6    | 33                              | 6    | 123                 | 49,26   |
| GZ-2        | 467474,171      | 4418988,792    | 67                        | 1    | 183,755               | 8    | lits de sable             | 6    | Argile limoneuse | 3    | 26,3              | 10   | limon/argile              | 3    | 33                              | 6    | 104                 | 39,90   |
| DGZ-1       | 463215,565      | 4414635,267    | 61                        | 1    | 183,755               | 8    | basalte                   | 9    | Argile limoneuse | 3    | 29,4              | 10   | limon/argile              | 3    | 33                              | 6    | 113                 | 44,33   |
| DGZ-2       | 463354,4        | 4412465,865    | 69                        | 1    | 183,755               | 8    | basalte                   | 9    | Remblai          | 5    | 27,3              | 10   | limon/argile              | 3    | 33                              | 6    | 117                 | 46,31   |
| HZH-2       | 464317,665      | 4414110,735    | 87                        | 1    | 155,485               | 6    | basalte                   | 9    | argile           | 3    | 28,1              | 10   | limon/argile              | 3    | 33                              | 6    | 105                 | 40,39   |
| HZH-3       | 465886,426      | 4416989,488    | 58                        | 1    | 155,485               | 6    | lits de sable             | 6    | Sable limon      | 5    | 28,6              | 10   | sable, gravier avec limon | 6    | 33                              | 6    | 117                 | 46,31   |
| HZH-5       | 466778,004      | 4416994,776    | 67                        | 1    | 155,485               | 6    | lits de sable             | 6    | Remblai          | 5    | 26,7              | 10   | limon/argile              | 3    | 33                              | 6    | 100                 | 37,93   |
| WJ-1        | 456910,056      | 4430693,612    | 47                        | 1    | 70,675                | 3    | sable et gravier          | 8    | Argile limoneuse | 3    | 34,5              | 10   | basalt                    | 9    | 14                              | 4    | 114                 | 44,83   |
| DB-1        | 465193,798      | 4426278,561    | 70                        | 1    | 183,755               | 8    | sable et gravier          | 8    | Argile limoneuse | 3    | 23,5              | 10   | limon/argile              | 3    | 33                              | 6    | 110                 | 42,86   |
| DB-2        | 460839,443      | 4427216,423    | 59                        | 1    | 183,755               | 8    | Basalte                   | 9    | Remblai          | 5    | 29,0              | 10   | sable                     | 6    | 14                              | 4    | 126                 | 50,74   |
| DB-3        | 460968,049      | 4426607,943    | 63                        | 1    | 183,755               | 8    | sable et gravier          | 6    | Argile limoneuse | 3    | 31,1              | 10   | limon/argile              | 3    | 14                              | 4    | 98                  | 36,95   |

## ANNEXE 6 : POIDS ET CÔTES POUR LES CRITERES ET SOUS CRITERES DE LA METHODE DRASTIC

*Tableau 33: Côtes des critères du paramètre "D"*

|               | 22,8 - 30,4 | > 30,4 | <b>Vp</b>     | <b>Cp</b>   |
|---------------|-------------|--------|---------------|-------------|
| 22,8 - 30,4   | 1           | 1/2    | <b>0,71</b>   | <b>0,33</b> |
| > 30,4        | 2           | 1      | <b>1,41</b>   | <b>0,67</b> |
| Total         |             |        | <b>2,12</b>   | <b>1</b>    |
| <b>IC = 0</b> |             |        | <b>RC = 0</b> |             |

*Tableau 34 : Côtes des critères du paramètre "R"*

|                   | 50,8-101,6 | 101,6-177,8 | 177,8-254         | <b>Vp</b>   | <b>Cp</b>   |
|-------------------|------------|-------------|-------------------|-------------|-------------|
| 50,8-101,6        | 1          | 1/3         | 1/5               | <b>0,41</b> | <b>0,11</b> |
| 101,6-177,8       | 3          | 1           | 1/2               | <b>1,14</b> | <b>0,31</b> |
| 177,8-254         | 5          | 2           | 1                 | <b>2,15</b> | <b>0,58</b> |
| Total             |            |             |                   | <b>3,70</b> | <b>1</b>    |
| <b>IC = 0,002</b> |            |             | <b>RC = 0,003</b> |             |             |

*Tableau 35: Côtes des critères du paramètre "A"*

|                  | Sable | Sable et gravier | sable fin        | <b>Vp</b>   | <b>Cp</b>   |
|------------------|-------|------------------|------------------|-------------|-------------|
| Sable            | 1     | 1/3              | 1/3              | <b>0,48</b> | <b>0,14</b> |
| Sable et gravier | 3     | 1                | 1/2              | <b>1,14</b> | <b>0,33</b> |
| Basalte          | 3     | 2                | 1                | <b>1,82</b> | <b>0,53</b> |
| Total            | 7     |                  |                  | <b>3,44</b> | <b>1</b>    |
| <b>IC = 0,03</b> |       |                  | <b>RC = 0,05</b> |             |             |

Tableau 36: Côtes des critères du paramètre "S"

|                   | Argile | Gravier | Remblai sable | Vp                | Cp          |
|-------------------|--------|---------|---------------|-------------------|-------------|
| Argile            | 1      | 1/2     | 1/3           | <b>0,55</b>       | <b>0,16</b> |
| Limono sableux    | 2      | 1       | 1/2           | <b>1,00</b>       | <b>0,30</b> |
| Remblai sable     | 3      | 2       | 1             | <b>1,82</b>       | <b>0,54</b> |
| Total             |        |         |               | <b>3,37</b>       | <b>1</b>    |
| <b>IC = 0,005</b> |        |         |               | <b>RC = 0,008</b> |             |

- Pour les critères de la topographie T

Etant donné que le paramètre T ne prend en compte que l'intervalle 0-2 la côte qui lui est assignée est de 1.

Tableau 37 : Côtes des critères du paramètre "I"

|                          | Schiste/limon/argile | Sable gravier avec limon | Sable gravier | Basalte           | Vp          | Cp          |
|--------------------------|----------------------|--------------------------|---------------|-------------------|-------------|-------------|
| Schiste/limon/argile     | 1                    | 1/3                      | 1/6           | 1/8               | <b>0,29</b> | <b>0,05</b> |
| Sable gravier avec limon | 3                    | 1                        | 1/2           | 1/3               | <b>0,84</b> | <b>0,16</b> |
| Sable gravier            | 6                    | 2                        | 1             | 1/2               | <b>1,57</b> | <b>0,29</b> |
| Basalte                  | 8                    | 3                        | 2             | 1                 | <b>2,63</b> | <b>0,49</b> |
| Total                    |                      |                          |               |                   | <b>6,63</b> | <b>1</b>    |
| <b>IC = 0,045</b>        |                      |                          |               | <b>RC = 0,048</b> |             |             |

Tableau 38 : Côtes des critères du paramètre "C"

|               | 12_28 | 28_41 | Vp            | Cp          |
|---------------|-------|-------|---------------|-------------|
| 12_28         | 1     | 1/3   | <b>0,58</b>   | <b>0,25</b> |
| 28_41         | 3     | 1     | <b>1,73</b>   | <b>0,75</b> |
| Total         |       |       | <b>2,31</b>   | <b>1</b>    |
| <b>IC = 0</b> |       |       | <b>RC = 0</b> |             |

- Pour les paramètres de la méthode DRASTIC

Tableau 39 : Poids des paramètres DRASTIC

|                   | D   | R   | A   | S   | T                 | I   | C   | Vp          | Cp          |
|-------------------|-----|-----|-----|-----|-------------------|-----|-----|-------------|-------------|
| D                 | 1   | 2   | 3   | 4   | 5                 | 1   | 3   | <b>2,32</b> | <b>0,27</b> |
| R                 | 1/2 | 1   | 2   | 3   | 4                 | 1/2 | 2   | <b>1,43</b> | <b>0,17</b> |
| A                 | 1/3 | 1/2 | 1   | 2   | 3                 | 1/3 | 1   | <b>0,85</b> | <b>0,10</b> |
| S                 | 1/4 | 1/3 | 1/2 | 1   | 2                 | 1/4 | 1/2 | <b>0,52</b> | <b>0,06</b> |
| T                 | 1/5 | 1/4 | 1/3 | 1/2 | 1                 | 1/5 | 1/3 | <b>0,34</b> | <b>0,04</b> |
| I                 | 1   | 2   | 3   | 4   | 5                 | 1   | 3   | <b>2,32</b> | <b>0,27</b> |
| C                 | 1/3 | 1/2 | 1   | 2   | 3                 | 1/3 | 1   | <b>0,85</b> | <b>0,10</b> |
| Total             |     |     |     |     |                   |     |     | <b>8,64</b> | <b>1</b>    |
| <b>IC = 0,015</b> |     |     |     |     | <b>RC = 0,011</b> |     |     |             |             |



## ANNEXE 7 : DETAILS DE CALCUL DE LA METHODE DRASTIC -AHP

Tableau 40: Détails de calcul méthode DRASTIC-AHP

| Identifiant | Longitude (UTM) | Latitude (UTM) | Profondeur de l'eau D (m) |       | Recharge nette R (mm) |       | Matériaux de l'aquifère A |       | Type de sol S |       | Topographie T (%) |       | Impact de la zone vadose I |       | Conductivité hydraulique C (m/jr) |       | Indice DRASTIC (ID) | ID en % |
|-------------|-----------------|----------------|---------------------------|-------|-----------------------|-------|---------------------------|-------|---------------|-------|-------------------|-------|----------------------------|-------|-----------------------------------|-------|---------------------|---------|
|             |                 |                | côte                      | Poids | côte                  | Poids | côte                      | Poids | côte          | Poids | côte              | Poids | côte                       | Poids | côte                              | Poids |                     |         |
| SH-1        | 460206,9        | 4435022,3      | 0,67                      | 5     | 0,58                  | 4     | 0,33                      | 3     | 0,16          | 2     | 1                 | 1     | 0,16                       | 5     | 0,25                              | 3     | 10                  | 0,47    |
| SH-2        | 460731,6        | 4436204,7      | 0,67                      | 5     | 0,58                  | 4     | 0,33                      | 3     | 0,3           | 2     | 1                 | 1     | 0,16                       | 5     | 0,25                              | 3     | 10                  | 0,54    |
| LGY-1       | 458568,04       | 4433163,6      | 0,67                      | 5     | 0,58                  | 4     | 0,33                      | 3     | 0,16          | 2     | 1                 | 1     | 0,05                       | 5     | 0,25                              | 3     | 9                   | 0,35    |
| SJF-1       | 464834,82       | 4420350,5      | 0,67                      | 5     | 0,58                  | 4     | 0,14                      | 3     | 0,3           | 2     | 1                 | 1     | 0,16                       | 5     | 0,75                              | 3     | 11                  | 0,75    |
| GBD-1       | 461240,02       | 4418541,9      | 0,67                      | 5     | 0,11                  | 4     | 0,14                      | 3     | 0,54          | 2     | 1                 | 1     | 0,16                       | 5     | 0,25                              | 3     | 8                   | 0,08    |
| GBD-2       | 461700,59       | 4419844,7      | 0,67                      | 5     | 0,11                  | 4     | 0,33                      | 3     | 0,54          | 2     | 1                 | 1     | 0,05                       | 5     | 0,25                              | 3     | 8                   | 0,09    |
| WSY-1       | 462011,42       | 4415410        | 0,67                      | 5     | 0,58                  | 4     | 0,14                      | 3     | 0,54          | 2     | 1                 | 1     | 0,05                       | 5     | 0,25                              | 3     | 9                   | 0,39    |
| SBLD-1      | 460198,81       | 4413844,6      | 0,67                      | 5     | 0,58                  | 4     | 0,33                      | 3     | 0,54          | 2     | 1                 | 1     | 0,16                       | 5     | 0,25                              | 3     | 10                  | 0,65    |
| LMQ-2       | 454673,11       | 4424792,9      | 0,67                      | 5     | 0,58                  | 4     | 0,14                      | 3     | 0,54          | 2     | 1                 | 1     | 0,16                       | 5     | 0,25                              | 3     | 10                  | 0,51    |
| SJF-2       | 468032,83       | 4417655        | 0,67                      | 5     | 0,58                  | 4     | 0,53                      | 3     | 0,54          | 2     | 1                 | 1     | 0,05                       | 5     | 0,75                              | 3     | 12                  | 1,00    |
| CGZ-1       | 458966,82       | 4434712,5      | 0,67                      | 5     | 0,58                  | 4     | 0,33                      | 3     | 0,3           | 2     | 1                 | 1     | 0,16                       | 5     | 0,25                              | 3     | 10                  | 0,54    |
| CGZ-2       | 458329,95       | 4434140,2      | 0,67                      | 5     | 0,58                  | 4     | 0,14                      | 3     | 0,16          | 2     | 1                 | 1     | 0,49                       | 5     | 0,25                              | 3     | 11                  | 0,72    |
| ALL-1       | 450137,18       | 4436024,5      | 0,67                      | 5     | 0,58                  | 4     | 0,14                      | 3     | 0,54          | 2     | 1                 | 1     | 0,05                       | 5     | 0,25                              | 3     | 9                   | 0,39    |
| HG-1        | 456552,36       | 4436708,5      | 0,33                      | 5     | 0,58                  | 4     | 0,14                      | 3     | 0,16          | 2     | 1                 | 1     | 0,49                       | 5     | 0,25                              | 3     | 9                   | 0,33    |
| JT-1        | 460298,59       | 4429110,8      | 0,67                      | 5     | 0,11                  | 4     | 0,14                      | 3     | 0,54          | 2     | 1                 | 1     | 0,16                       | 5     | 0,25                              | 3     | 8                   | 0,08    |
| DF-1        | 459289,82       | 4425803,4      | 0,67                      | 5     | 0,11                  | 4     | 0,33                      | 3     | 0,54          | 2     | 1                 | 1     | 0,16                       | 5     | 0,25                              | 3     | 8                   | 0,22    |

|       |           |           |      |   |      |   |      |   |      |   |   |   |      |   |      |   |    |      |
|-------|-----------|-----------|------|---|------|---|------|---|------|---|---|---|------|---|------|---|----|------|
| JZ-1  | 466857,37 | 4428481,6 | 0,67 | 5 | 0,58 | 4 | 0,14 | 3 | 0,54 | 2 | 1 | 1 | 0,16 | 5 | 0,75 | 3 | 11 | 0,86 |
| JZ-2  | 468472,91 | 4425187,6 | 0,67 | 5 | 0,58 | 4 | 0,14 | 3 | 0,16 | 2 | 1 | 1 | 0,05 | 5 | 0,75 | 3 | 10 | 0,56 |
| JZ-3  | 467240,2  | 4426680,8 | 0,67 | 5 | 0,58 | 4 | 0,33 | 3 | 0,54 | 2 | 1 | 1 | 0,16 | 5 | 0,75 | 3 | 12 | 0,99 |
| LGY-2 | 452701,82 | 4436170,6 | 0,67 | 5 | 0,58 | 4 | 0,33 | 3 | 0,54 | 2 | 1 | 1 | 0,05 | 5 | 0,25 | 3 | 10 | 0,52 |
| NMF-1 | 457077,3  | 4418379,9 | 0,67 | 5 | 0,58 | 4 | 0,14 | 3 | 0,16 | 2 | 1 | 1 | 0,05 | 5 | 0,25 | 3 | 8  | 0,22 |
| JCL-1 | 460820,05 | 4433419,3 | 0,33 | 5 | 0,58 | 4 | 0,14 | 3 | 0,54 | 2 | 1 | 1 | 0,05 | 5 | 0,25 | 3 | 7  | 0,00 |
| XHM-1 | 456311,78 | 4411760,6 | 0,67 | 5 | 0,31 | 4 | 0,33 | 3 | 0,3  | 2 | 1 | 1 | 0,16 | 5 | 0,75 | 3 | 10 | 0,63 |
| XHM-2 | 456356,25 | 4411332,6 | 0,67 | 5 | 0,31 | 4 | 0,33 | 3 | 0,16 | 2 | 1 | 1 | 0,05 | 5 | 0,75 | 3 | 9  | 0,44 |
| CY-1  | 465189,03 | 4422688,1 | 0,67 | 5 | 0,58 | 4 | 0,14 | 3 | 0,16 | 2 | 1 | 1 | 0,05 | 5 | 0,75 | 3 | 10 | 0,56 |
| CY-2  | 467193,79 | 4421193,3 | 0,67 | 5 | 0,58 | 4 | 0,14 | 3 | 0,16 | 2 | 1 | 1 | 0,05 | 5 | 0,75 | 3 | 10 | 0,56 |
| GZ-1  | 467305,19 | 4418632,1 | 0,67 | 5 | 0,58 | 4 | 0,14 | 3 | 0,54 | 2 | 1 | 1 | 0,16 | 5 | 0,75 | 3 | 11 | 0,86 |
| GZ-2  | 467474,17 | 4418988,8 | 0,67 | 5 | 0,58 | 4 | 0,14 | 3 | 0,16 | 2 | 1 | 1 | 0,05 | 5 | 0,75 | 3 | 10 | 0,56 |
| DGZ-1 | 463215,57 | 4414635,3 | 0,67 | 5 | 0,58 | 4 | 0,53 | 3 | 0,16 | 2 | 1 | 1 | 0,05 | 5 | 0,75 | 3 | 11 | 0,83 |
| DGZ-2 | 463354,4  | 4412465,9 | 0,67 | 5 | 0,58 | 4 | 0,53 | 3 | 0,54 | 2 | 1 | 1 | 0,05 | 5 | 0,75 | 3 | 12 | 1,00 |
| HZH-2 | 464317,67 | 4414110,7 | 0,67 | 5 | 0,31 | 4 | 0,53 | 3 | 0,16 | 2 | 1 | 1 | 0,05 | 5 | 0,75 | 3 | 10 | 0,58 |
| HZH-3 | 465886,43 | 4416989,5 | 0,67 | 5 | 0,31 | 4 | 0,14 | 3 | 0,54 | 2 | 1 | 1 | 0,16 | 5 | 0,75 | 3 | 10 | 0,61 |
| HZH-5 | 466778    | 4416994,8 | 0,67 | 5 | 0,31 | 4 | 0,14 | 3 | 0,54 | 2 | 1 | 1 | 0,05 | 5 | 0,75 | 3 | 10 | 0,49 |
| WJ-1  | 456910,06 | 4430693,6 | 0,67 | 5 | 0,11 | 4 | 0,33 | 3 | 0,16 | 2 | 1 | 1 | 0,49 | 5 | 0,25 | 3 | 9  | 0,42 |
| DB-1  | 465193,8  | 4426278,6 | 0,67 | 5 | 0,58 | 4 | 0,33 | 3 | 0,16 | 2 | 1 | 1 | 0,05 | 5 | 0,75 | 3 | 10 | 0,69 |
| DB-2  | 460839,44 | 4427216,4 | 0,67 | 5 | 0,58 | 4 | 0,53 | 3 | 0,54 | 2 | 1 | 1 | 0,16 | 5 | 0,25 | 3 | 11 | 0,78 |
| DB-3  | 460968,05 | 4426607,9 | 0,67 | 5 | 0,58 | 4 | 0,14 | 3 | 0,16 | 2 | 1 | 1 | 0,05 | 5 | 0,25 | 3 | 8  | 0,22 |

## ANNEXE 8 : DETAILS DE CALCUL DE LA METHODE AHP - DRASTIC

Tableau 41 : détails de calcul méthode AHP-DRASTIC

| Identifiant | longitude<br>(UTM) | Latitude<br>(UTM) | Profondeur<br>de l'eau D<br>(m) |       | Recharge<br>nette R<br>(mm) |       | Matériaux<br>de<br>l'aquifère<br>A |       | Type de<br>sol S |       | Topographie<br>T (%) |       | Impact de<br>la zone<br>vadose I |       | Conductivité<br>hydraulique<br>C (m/jr) |       | Indice<br>DRASTIC<br>(ID) | ID<br>en % |
|-------------|--------------------|-------------------|---------------------------------|-------|-----------------------------|-------|------------------------------------|-------|------------------|-------|----------------------|-------|----------------------------------|-------|---|-------|---------------------------|------------|
|             |                    |                   | côte                            | Poids | côte                        | Poids | côte                               | Poids | côte             | Poids | côte                 | Poids | côte                             | Poids | côte                                    | Poids |                           |            |
| SH-1        | 460206,9           | 4435022,28        | 1                               | 0,27  | 8                           | 0,17  | 8                                  | 0,1   | 3                | 0,06  | 10                   | 0,04  | 6                                | 0,27  | 4                                       | 0,1   | 5                         | 0,72       |
| SH-2        | 460731,6           | 4436204,67        | 1                               | 0,27  | 8                           | 0,17  | 8                                  | 0,1   | 4                | 0,06  | 10                   | 0,04  | 6                                | 0,27  | 4                                       | 0,1   | 5                         | 0,74       |
| LGY-1       | 458568,04          | 4433163,57        | 1                               | 0,27  | 8                           | 0,17  | 8                                  | 0,1   | 3                | 0,06  | 10                   | 0,04  | 3                                | 0,27  | 4                                       | 0,1   | 4                         | 0,34       |
| SJF-1       | 464834,82          | 4420350,53        | 1                               | 0,27  | 8                           | 0,17  | 6                                  | 0,1   | 4                | 0,06  | 10                   | 0,04  | 6                                | 0,27  | 6                                       | 0,1   | 5                         | 0,74       |
| GBD-1       | 461240,02          | 4418541,94        | 1                               | 0,27  | 3                           | 0,17  | 6                                  | 0,1   | 5                | 0,06  | 10                   | 0,04  | 6                                | 0,27  | 4                                       | 0,1   | 4                         | 0,28       |
| GBD-2       | 461700,59          | 4419844,74        | 1                               | 0,27  | 3                           | 0,17  | 8                                  | 0,1   | 5                | 0,06  | 10                   | 0,04  | 3                                | 0,27  | 4                                       | 0,1   | 3                         | 0,00       |
| WSY-1       | 462011,42          | 4415409,96        | 1                               | 0,27  | 8                           | 0,17  | 6                                  | 0,1   | 5                | 0,06  | 10                   | 0,04  | 3                                | 0,27  | 4                                       | 0,1   | 4                         | 0,30       |
| SBLD-1      | 460198,81          | 4413844,59        | 1                               | 0,27  | 8                           | 0,17  | 8                                  | 0,1   | 5                | 0,06  | 10                   | 0,04  | 6                                | 0,27  | 4                                       | 0,1   | 5                         | 0,77       |
| LMQ-2       | 454673,11          | 4424792,89        | 1                               | 0,27  | 8                           | 0,17  | 6                                  | 0,1   | 5                | 0,06  | 10                   | 0,04  | 6                                | 0,27  | 4                                       | 0,1   | 5                         | 0,68       |
| SJF-2       | 468032,83          | 4417654,98        | 1                               | 0,27  | 8                           | 0,17  | 9                                  | 0,1   | 5                | 0,06  | 10                   | 0,04  | 3                                | 0,27  | 6                                       | 0,1   | 5                         | 0,53       |
| CGZ-1       | 458966,82          | 4434712,52        | 1                               | 0,27  | 8                           | 0,17  | 8                                  | 0,1   | 4                | 0,06  | 10                   | 0,04  | 6                                | 0,27  | 4                                       | 0,1   | 5                         | 0,74       |
| CGZ-2       | 458329,95          | 4434140,24        | 1                               | 0,27  | 8                           | 0,17  | 6                                  | 0,1   | 3                | 0,06  | 10                   | 0,04  | 9                                | 0,27  | 4                                       | 0,1   | 6                         | 1,00       |
| ALL-1       | 450137,18          | 4436024,54        | 1                               | 0,27  | 8                           | 0,17  | 6                                  | 0,1   | 5                | 0,06  | 10                   | 0,04  | 3                                | 0,27  | 4                                       | 0,1   | 4                         | 0,30       |
| HG-1        | 456552,36          | 4436708,45        | 2                               | 0,27  | 8                           | 0,17  | 6                                  | 0,1   | 3                | 0,06  | 10                   | 0,04  | 8                                | 0,27  | 4                                       | 0,1   | 6                         | 1,00       |
| JT-1        | 460298,59          | 4429110,76        | 1                               | 0,27  | 3                           | 0,17  | 6                                  | 0,1   | 5                | 0,06  | 10                   | 0,04  | 6                                | 0,27  | 4                                       | 0,1   | 4                         | 0,28       |
| DF-1        | 459289,82          | 4425803,37        | 1                               | 0,27  | 3                           | 0,17  | 8                                  | 0,1   | 5                | 0,06  | 10                   | 0,04  | 6                                | 0,27  | 4                                       | 0,1   | 4                         | 0,38       |
| JZ-1        | 466857,37          | 4428481,55        | 1                               | 0,27  | 8                           | 0,17  | 6                                  | 0,1   | 5                | 0,06  | 10                   | 0,04  | 6                                | 0,27  | 6                                       | 0,1   | 5                         | 0,77       |
| JZ-2        | 468472,91          | 4425187,57        | 1                               | 0,27  | 8                           | 0,17  | 6                                  | 0,1   | 3                | 0,06  | 10                   | 0,04  | 3                                | 0,27  | 6                                       | 0,1   | 4                         | 0,34       |
| JZ-3        | 467240,2           | 4426680,77        | 1                               | 0,27  | 8                           | 0,17  | 8                                  | 0,1   | 5                | 0,06  | 10                   | 0,04  | 6                                | 0,27  | 6                                       | 0,1   | 5                         | 0,87       |
| LGY-2       | 452701,82          | 4436170,59        | 1                               | 0,27  | 8                           | 0,17  | 8                                  | 0,1   | 5                | 0,06  | 10                   | 0,04  | 3                                | 0,27  | 4                                       | 0,1   | 4                         | 0,40       |

|       |           |            |   |      |   |      |   |     |   |      |    |      |   |      |   |     |   |      |
|-------|-----------|------------|---|------|---|------|---|-----|---|------|----|------|---|------|---|-----|---|------|
| NMF-1 | 457077,3  | 4418379,88 | 1 | 0,27 | 8 | 0,17 | 6 | 0,1 | 3 | 0,06 | 10 | 0,04 | 3 | 0,27 | 4 | 0,1 | 4 | 0,25 |
| JCL-1 | 460820,05 | 4433419,35 | 2 | 0,27 | 8 | 0,17 | 6 | 0,1 | 5 | 0,06 | 10 | 0,04 | 3 | 0,27 | 4 | 0,1 | 4 | 0,43 |
| XHM-1 | 456311,78 | 4411760,55 | 1 | 0,27 | 6 | 0,17 | 8 | 0,1 | 4 | 0,06 | 10 | 0,04 | 6 | 0,27 | 6 | 0,1 | 5 | 0,68 |
| XHM-2 | 456356,25 | 4411332,59 | 1 | 0,27 | 6 | 0,17 | 8 | 0,1 | 3 | 0,06 | 10 | 0,04 | 3 | 0,27 | 6 | 0,1 | 4 | 0,27 |
| CY-1  | 465189,03 | 4422688,1  | 1 | 0,27 | 8 | 0,17 | 6 | 0,1 | 3 | 0,06 | 10 | 0,04 | 3 | 0,27 | 6 | 0,1 | 4 | 0,34 |
| CY-2  | 467193,79 | 4421193,34 | 1 | 0,27 | 8 | 0,17 | 6 | 0,1 | 3 | 0,06 | 10 | 0,04 | 3 | 0,27 | 6 | 0,1 | 4 | 0,34 |
| GZ-1  | 467305,19 | 4418632,06 | 1 | 0,27 | 8 | 0,17 | 6 | 0,1 | 5 | 0,06 | 10 | 0,04 | 6 | 0,27 | 6 | 0,1 | 5 | 0,77 |
| GZ-2  | 467474,17 | 4418988,79 | 1 | 0,27 | 8 | 0,17 | 6 | 0,1 | 3 | 0,06 | 10 | 0,04 | 3 | 0,27 | 6 | 0,1 | 4 | 0,34 |
| DGZ-1 | 463215,57 | 4414635,27 | 1 | 0,27 | 8 | 0,17 | 9 | 0,1 | 3 | 0,06 | 10 | 0,04 | 3 | 0,27 | 6 | 0,1 | 5 | 0,48 |
| DGZ-2 | 463354,4  | 4412465,87 | 1 | 0,27 | 8 | 0,17 | 9 | 0,1 | 5 | 0,06 | 10 | 0,04 | 3 | 0,27 | 6 | 0,1 | 5 | 0,53 |
| HZH-2 | 464317,67 | 4414110,74 | 1 | 0,27 | 6 | 0,17 | 9 | 0,1 | 3 | 0,06 | 10 | 0,04 | 3 | 0,27 | 6 | 0,1 | 4 | 0,32 |
| HZH-3 | 465886,43 | 4416989,49 | 1 | 0,27 | 6 | 0,17 | 6 | 0,1 | 5 | 0,06 | 10 | 0,04 | 6 | 0,27 | 6 | 0,1 | 5 | 0,61 |
| HZH-5 | 466778    | 4416994,78 | 1 | 0,27 | 6 | 0,17 | 6 | 0,1 | 5 | 0,06 | 10 | 0,04 | 3 | 0,27 | 6 | 0,1 | 4 | 0,24 |
| WJ-1  | 456910,06 | 4430693,61 | 1 | 0,27 | 3 | 0,17 | 8 | 0,1 | 3 | 0,06 | 10 | 0,04 | 9 | 0,27 | 4 | 0,1 | 5 | 0,70 |
| DB-1  | 465193,8  | 4426278,56 | 1 | 0,27 | 8 | 0,17 | 8 | 0,1 | 3 | 0,06 | 10 | 0,04 | 3 | 0,27 | 6 | 0,1 | 4 | 0,43 |
| DB-2  | 460839,44 | 4427216,42 | 1 | 0,27 | 8 | 0,17 | 9 | 0,1 | 5 | 0,06 | 10 | 0,04 | 6 | 0,27 | 4 | 0,1 | 5 | 0,82 |
| DB-3  | 460968,05 | 4426607,94 | 1 | 0,27 | 8 | 0,17 | 6 | 0,1 | 3 | 0,06 | 10 | 0,04 | 3 | 0,27 | 4 | 0,1 | 4 | 0,25 |

## ANNEXE 9 : DETAILS DE CALCUL DE LA METHODE AHP – AHP

Tableau 42 : Détails de calcul méthode AHP-AHP

| Identifiant | longitude (UTM) | Latitude (UTM) | Profondeur de l'eau D (m) |       | Recharge nette R (mm) |       | Matériaux de l'aquifère A |       | Type de sol S |       | Topographie T (%) |       | Impact de la zone vadose I |       | Conductivité hydraulique C (m/jr) |       | Indice DRASTIC (ID) | ID en % |
|-------------|-----------------|----------------|---------------------------|-------|-----------------------|-------|---------------------------|-------|---------------|-------|-------------------|-------|----------------------------|-------|-----------------------------------|-------|---------------------|---------|
|             |                 |                | côte                      | Poids | côte                  | Poids | côte                      | Poids | côte          | Poids | côte              | Poids | côte                       | Poids | côte                              | Poids |                     |         |
| SH-1        | 460206,9        | 4435022,3      | 0,67                      | 0,27  | 0,58                  | 0,17  | 0,33                      | 0,1   | 0,16          | 0,06  | 1                 | 0,04  | 0,16                       | 0,27  | 0,25                              | 0,1   | 0,43                | 0,62    |
| SH-2        | 460731,6        | 4436204,7      | 0,67                      | 0,27  | 0,58                  | 0,17  | 0,33                      | 0,1   | 0,3           | 0,06  | 1                 | 0,04  | 0,16                       | 0,27  | 0,25                              | 0,1   | 0,44                | 0,66    |
| LGY-1       | 458568,04       | 4433163,6      | 0,67                      | 0,27  | 0,58                  | 0,17  | 0,33                      | 0,1   | 0,16          | 0,06  | 1                 | 0,04  | 0,05                       | 0,27  | 0,25                              | 0,1   | 0,40                | 0,46    |
| SJF-1       | 464834,82       | 4420350,5      | 0,67                      | 0,27  | 0,58                  | 0,17  | 0,14                      | 0,1   | 0,3           | 0,06  | 1                 | 0,04  | 0,16                       | 0,27  | 0,75                              | 0,1   | 0,47                | 0,82    |
| GBD-1       | 461240,02       | 4418541,9      | 0,67                      | 0,27  | 0,11                  | 0,17  | 0,14                      | 0,1   | 0,54          | 0,06  | 1                 | 0,04  | 0,16                       | 0,27  | 0,25                              | 0,1   | 0,35                | 0,22    |
| GBD-2       | 461700,59       | 4419844,7      | 0,67                      | 0,27  | 0,11                  | 0,17  | 0,33                      | 0,1   | 0,54          | 0,06  | 1                 | 0,04  | 0,05                       | 0,27  | 0,25                              | 0,1   | 0,34                | 0,16    |
| WSY-1       | 462011,42       | 4415410        | 0,67                      | 0,27  | 0,58                  | 0,17  | 0,14                      | 0,1   | 0,54          | 0,06  | 1                 | 0,04  | 0,05                       | 0,27  | 0,25                              | 0,1   | 0,40                | 0,48    |
| SBLD-1      | 460198,81       | 4413844,6      | 0,67                      | 0,27  | 0,58                  | 0,17  | 0,33                      | 0,1   | 0,54          | 0,06  | 1                 | 0,04  | 0,16                       | 0,27  | 0,25                              | 0,1   | 0,45                | 0,74    |
| LMQ-2       | 454673,11       | 4424792,9      | 0,67                      | 0,27  | 0,58                  | 0,17  | 0,14                      | 0,1   | 0,54          | 0,06  | 1                 | 0,04  | 0,16                       | 0,27  | 0,25                              | 0,1   | 0,43                | 0,64    |
| SJF-2       | 468032,83       | 4417655        | 0,67                      | 0,27  | 0,58                  | 0,17  | 0,53                      | 0,1   | 0,54          | 0,06  | 1                 | 0,04  | 0,05                       | 0,27  | 0,75                              | 0,1   | 0,49                | 0,95    |
| CGZ-1       | 458966,82       | 4434712,5      | 0,67                      | 0,27  | 0,58                  | 0,17  | 0,33                      | 0,1   | 0,3           | 0,06  | 1                 | 0,04  | 0,16                       | 0,27  | 0,25                              | 0,1   | 0,44                | 0,66    |
| CGZ-2       | 458329,95       | 4434140,2      | 0,67                      | 0,27  | 0,58                  | 0,17  | 0,14                      | 0,1   | 0,16          | 0,06  | 1                 | 0,04  | 0,49                       | 0,27  | 0,25                              | 0,1   | 0,50                | 0,99    |
| ALL-1       | 450137,18       | 4436024,5      | 0,67                      | 0,27  | 0,58                  | 0,17  | 0,14                      | 0,1   | 0,54          | 0,06  | 1                 | 0,04  | 0,05                       | 0,27  | 0,25                              | 0,1   | 0,40                | 0,48    |
| HG-1        | 456552,36       | 4436708,5      | 0,33                      | 0,27  | 0,58                  | 0,17  | 0,14                      | 0,1   | 0,16          | 0,06  | 1                 | 0,04  | 0,49                       | 0,27  | 0,25                              | 0,1   | 0,41                | 0,50    |
| JT-1        | 460298,59       | 4429110,8      | 0,67                      | 0,27  | 0,11                  | 0,17  | 0,14                      | 0,1   | 0,54          | 0,06  | 1                 | 0,04  | 0,16                       | 0,27  | 0,25                              | 0,1   | 0,35                | 0,22    |
| DF-1        | 459289,82       | 4425803,4      | 0,67                      | 0,27  | 0,11                  | 0,17  | 0,33                      | 0,1   | 0,54          | 0,06  | 1                 | 0,04  | 0,16                       | 0,27  | 0,25                              | 0,1   | 0,37                | 0,32    |
| JZ-1        | 466857,37       | 4428481,6      | 0,67                      | 0,27  | 0,58                  | 0,17  | 0,14                      | 0,1   | 0,54          | 0,06  | 1                 | 0,04  | 0,16                       | 0,27  | 0,75                              | 0,1   | 0,48                | 0,90    |
| JZ-2        | 468472,91       | 4425187,6      | 0,67                      | 0,27  | 0,58                  | 0,17  | 0,14                      | 0,1   | 0,16          | 0,06  | 1                 | 0,04  | 0,05                       | 0,27  | 0,75                              | 0,1   | 0,43                | 0,62    |
| JZ-3        | 467240,2        | 4426680,8      | 0,67                      | 0,27  | 0,58                  | 0,17  | 0,33                      | 0,1   | 0,54          | 0,06  | 1                 | 0,04  | 0,16                       | 0,27  | 0,75                              | 0,1   | 0,50                | 1,00    |
| LGY-2       | 452701,82       | 4436170,6      | 0,67                      | 0,27  | 0,58                  | 0,17  | 0,33                      | 0,1   | 0,54          | 0,06  | 1                 | 0,04  | 0,05                       | 0,27  | 0,25                              | 0,1   | 0,42                | 0,58    |
| NMF-1       | 457077,3        | 4418379,9      | 0,67                      | 0,27  | 0,58                  | 0,17  | 0,14                      | 0,1   | 0,16          | 0,06  | 1                 | 0,04  | 0,05                       | 0,27  | 0,25                              | 0,1   | 0,38                | 0,36    |
| JCL-1       | 460820,05       | 4433419,3      | 0,33                      | 0,27  | 0,58                  | 0,17  | 0,14                      | 0,1   | 0,54          | 0,06  | 1                 | 0,04  | 0,05                       | 0,27  | 0,25                              | 0,1   | 0,31                | 0,00    |

|       |           |           |      |      |      |      |      |     |      |      |   |      |      |      |      |     |      |      |
|-------|-----------|-----------|------|------|------|------|------|-----|------|------|---|------|------|------|------|-----|------|------|
| XHM-1 | 456311,78 | 4411760,6 | 0,67 | 0,27 | 0,31 | 0,17 | 0,33 | 0,1 | 0,3  | 0,06 | 1 | 0,04 | 0,16 | 0,27 | 0,75 | 0,1 | 0,44 | 0,68 |
| XHM-2 | 456356,25 | 4411332,6 | 0,67 | 0,27 | 0,31 | 0,17 | 0,33 | 0,1 | 0,16 | 0,06 | 1 | 0,04 | 0,05 | 0,27 | 0,75 | 0,1 | 0,40 | 0,48 |
| CY-1  | 465189,03 | 4422688,1 | 0,67 | 0,27 | 0,58 | 0,17 | 0,14 | 0,1 | 0,16 | 0,06 | 1 | 0,04 | 0,05 | 0,27 | 0,75 | 0,1 | 0,43 | 0,62 |
| CY-2  | 467193,79 | 4421193,3 | 0,67 | 0,27 | 0,58 | 0,17 | 0,14 | 0,1 | 0,16 | 0,06 | 1 | 0,04 | 0,05 | 0,27 | 0,75 | 0,1 | 0,43 | 0,62 |
| GZ-1  | 467305,19 | 4418632,1 | 0,67 | 0,27 | 0,58 | 0,17 | 0,14 | 0,1 | 0,54 | 0,06 | 1 | 0,04 | 0,16 | 0,27 | 0,75 | 0,1 | 0,48 | 0,90 |
| GZ-2  | 467474,17 | 4418988,8 | 0,67 | 0,27 | 0,58 | 0,17 | 0,14 | 0,1 | 0,16 | 0,06 | 1 | 0,04 | 0,05 | 0,27 | 0,75 | 0,1 | 0,43 | 0,62 |
| DGZ-1 | 463215,57 | 4414635,3 | 0,67 | 0,27 | 0,58 | 0,17 | 0,53 | 0,1 | 0,16 | 0,06 | 1 | 0,04 | 0,05 | 0,27 | 0,75 | 0,1 | 0,47 | 0,83 |
| DGZ-2 | 463354,4  | 4412465,9 | 0,67 | 0,27 | 0,58 | 0,17 | 0,53 | 0,1 | 0,54 | 0,06 | 1 | 0,04 | 0,05 | 0,27 | 0,75 | 0,1 | 0,49 | 0,95 |
| HZH-2 | 464317,67 | 4414110,7 | 0,67 | 0,27 | 0,31 | 0,17 | 0,53 | 0,1 | 0,16 | 0,06 | 1 | 0,04 | 0,05 | 0,27 | 0,75 | 0,1 | 0,42 | 0,59 |
| HZH-3 | 465886,43 | 4416989,5 | 0,67 | 0,27 | 0,31 | 0,17 | 0,14 | 0,1 | 0,54 | 0,06 | 1 | 0,04 | 0,16 | 0,27 | 0,75 | 0,1 | 0,44 | 0,66 |
| HZH-5 | 466778    | 4416994,8 | 0,67 | 0,27 | 0,31 | 0,17 | 0,14 | 0,1 | 0,54 | 0,06 | 1 | 0,04 | 0,05 | 0,27 | 0,75 | 0,1 | 0,41 | 0,50 |
| WJ-1  | 456910,06 | 4430693,6 | 0,67 | 0,27 | 0,11 | 0,17 | 0,33 | 0,1 | 0,16 | 0,06 | 1 | 0,04 | 0,49 | 0,27 | 0,25 | 0,1 | 0,44 | 0,67 |
| DB-1  | 465193,8  | 4426278,6 | 0,67 | 0,27 | 0,58 | 0,17 | 0,33 | 0,1 | 0,16 | 0,06 | 1 | 0,04 | 0,05 | 0,27 | 0,75 | 0,1 | 0,45 | 0,72 |
| DB-2  | 460839,44 | 4427216,4 | 0,67 | 0,27 | 0,58 | 0,17 | 0,53 | 0,1 | 0,54 | 0,06 | 1 | 0,04 | 0,16 | 0,27 | 0,25 | 0,1 | 0,47 | 0,84 |
| DB-3  | 460968,05 | 4426607,9 | 0,67 | 0,27 | 0,58 | 0,17 | 0,14 | 0,1 | 0,16 | 0,06 | 1 | 0,04 | 0,05 | 0,27 | 0,25 | 0,1 | 0,38 | 0,36 |

## ANNEXE 10 : TABLEAU RECAPITULATIF DES POIDS ET COTES EN FONCTION DES METHODES.

Tableau 43 : Tableau récapitulatif des côtes et des poids en fonction des méthodes

| Paramètres               |                          | AHP - DRASTIC |       | DRASTIC - AHP |       | AHP - AHP |       |
|--------------------------|--------------------------|---------------|-------|---------------|-------|-----------|-------|
| Critères                 | Sous critères            | Note          | Poids | Note          | Poids | Note      | Poids |
| Profondeur de l'eau (m)  | 22,8 - 30,4              | 0,33          | 5     | 2             | 0,27  | 0,33      | 0,27  |
|                          | > 30,4                   | 0,67          |       | 1             |       | 0,67      |       |
| Recharge nette (mm)      | 50,8 - 101,6             | 0,11          | 4     | 3             | 0,17  | 0,11      | 0,17  |
|                          | 101,6 - 177,8            | 0,31          |       | 6             |       | 0,31      |       |
|                          | 177,8 - 254              | 0,58          |       | 8             |       | 0,58      |       |
| Matériaux de l'aquifère  | Sable                    | 0,14          | 3     | 6             | 0,10  | 0,14      | 0,10  |
|                          | sable gravier            | 0,33          |       | 8             |       | 0,33      |       |
|                          | Basalte                  | 0,53          |       | 9             |       | 0,53      |       |
| Type de sol              | Argile                   | 0,16          | 2     | 3             | 0,06  | 0,16      | 0,06  |
|                          | limono sableux           | 0,30          |       | 4             |       | 0,30      |       |
|                          | Remblai                  | 0,54          |       | 5             |       | 0,54      |       |
| Topographie              | 0 - 2                    | 1,00          | 1     | 10            | 0,04  | 1,00      | 0,04  |
| Impact de la zone vadose | Schiste/Limon/argile     | 0,05          | 5     | 3             | 0,27  | 0,05      | 0,27  |
|                          | Sable gravier avec limon | 0,16          |       | 6             |       | 0,16      |       |
|                          | Sable gravier            | 0,29          |       | 8             |       | 0,29      |       |
|                          | Basalte                  | 0,49          |       | 9             |       | 0,49      |       |
| Conductivité hydraulique | 12 - 28                  | 0,25          | 3     | 4             | 0,10  | 0,25      | 0,10  |
|                          | 28 - 41                  | 0,75          |       | 6             |       | 0,75      |       |