

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

**Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou (UMMTO)**

Faculté du Génie de la Construction

**Département de Génie Civil**



## **MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

*En vue de l'obtention du diplôme de master  
De l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou*

**Filière : Génie Civil**

**Spécialité : Géotechnique**

### *Thème*

# **ETUDES DES RISQUES DANS LES PROJETS D'INFRASTRUCTURE EN ZONE KARSTIQUE**

*Présenté par :*

**M<sup>r</sup>/SAHALI WAHAB**

Devant le jury composé de :

<b>Mme LOUADJ SAMIA</b>	Maitre de conférence	A	à l'UMMTO	Présidente.
<b>Mme BAIDI BAHIA</b>	Maitre de conférence	A	à l'UMMTO	Examinatrice.
<b>Mr MELBOUCI BACHIR</b>	Professeur		à l'UMMTO	Encadrant.

Promotion : 2024/2025

## REMERCIEMENTS

**J**e tiens dans un premier temps à remercier **Allah** tout puissant de m'avoir donné la volonté et la patience dans l'accomplissement de ce modeste travail.

Je tiens à remercier particulièrement mon encadreur le professeur **monsieur MELBOUCI BACHIR** pour la confiance qu'il a mis en moi tout le long de ce travail. Je le remercie pour sa patience, sa disponibilité et pour ses orientations et ses encouragements. Ces petites lignes ne suffiront jamais afin d'exprimer son soutien et sa gentillesse.

**J**e remercie également les membres du jury, pour l'honneur qu'ils me font en acceptant d'évaluer ce travail, ainsi que pour l'intérêt qu'ils lui portent.

**J**e tiens à exprimer mes plus vives reconnaissances à tous les membres du jury de soutenance :

**J**e ne saurais oublier les enseignants et responsables du département de génie civil surtout les enseignants de master options géotechnique, et exepituellement le chef de la formation le professeur **KAHIL Ammar** pour la qualité de l'enseignement dispensé et pour l'encadrement général tout au long de ma formation.

**E**nfin, mes sincères remerciements s'adressent à toutes les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin pour réaliser ce travail. Je remercie tous mes collègues, pour leur soutien, leur esprit de collaboration et les échanges constructifs que nous avons eus. Votre présence a rendu cette expérience plus enrichissante et plus agréable.

**À tous, merci sincèrement.**

## *Dédicaces*

**J**e dédie ce mémoire à mes chers parents.

**M**erci pour votre amour inconditionnel, votre patience, vos sacrifices et votre soutien constant. C'est grâce à vous que j'ai pu avancer, garder confiance en moi et atteindre cette étape importante de ma vie. Vous êtes ma plus grande source de motivation et de courage.

**À** mes sœurs, je vous remercie pour votre bienveillance, vos encouragements et votre présence dans les moments difficiles comme dans les moments de joie. Votre soutien m'a profondément touché.

**J**e tiens également à dédier ce travail à mes collègues. Merci pour votre aide, vos conseils, votre bonne humeur et votre esprit d'équipe tout au long de ce parcours. Travailler à vos côtés a été une expérience enrichissante, à la fois sur le plan professionnel et humain.

**À** vous tous, un grand merci du fond du cœur.

**E**t toute ma promo et camarades qui ont accompagné IDDIR LHADI pour leur disponibilité et leur aide, Ould belkacem ghillas , Ouldoulhadj Aimad ,Juba Imerazen , Akkroune Assirem et Dehmane lydia .

<b>Introduction générale .....</b>	<b>1</b>
------------------------------------	----------

## **Chapitre I Définition géologique du karst \_ définition de l'aléa karstique.**

I. Introduction .....	3
I.2. Définition du karst .....	3
I.3. Définition géologique du karst .....	4
I.3.1. Géomorphologie. ....	6
I.3.2. Hydrogéologie. ....	6
I.3.3. Thermodynamique.....	7
I.4. Les formes du karst.....	7
I.4.1. Formes karstiques en surface.....	7
I.4.1.1. Doline. ....	7
I.4.1.2. Le lapiaz. ....	8
I.4.1.3. La diaclase. ....	9
I.4.1.4. Le poljé. ....	10
I.4.1.5. La faille.....	10
I.4.1.6. Epikarst.....	11
I.4.2. Les formes karstiques souterraine (endokarst).....	11
I.4.2.1. Les galeries et les réseaux souterrains .....	11
I.4.2.2. Les grottes et cavernes.....	12
I.5. Les différents types de karsts.....	14
I.5.1. Les karsts unaires.....	14
I.5.2. Les karsts binaires .....	14
I.5.3. Les karsts classiques .....	15
I.5.4. Les karsts sulfuriques .....	15
I.5.5. Les karsts profonds ou hydrothermaux .....	15
I.5.6. Les karsts littoraux.....	15
I.5.7. Les karsts jurassiens .....	15
I.5.8. Les karsts vauclusiens .....	15
I.6. Définition de l'aléa karstique .....	15

I.7. Méthodologie d'évaluation de l'aléa .....	17
I.7.1. Caractérisation du secteur étudié.....	17
I.7.2. Evaluation de la prédisposition aux mouvements de terrain .....	17
I.7.2.1. Prédisposition géologique.....	18
I.7.2.2. Principe de détermination de la prédisposition karstique.....	18
I.8. Les niveaux d'aléa karstique.....	21
I.9. Evaluation de l'intensité puis de l'aléa .....	22
I.10. Conclusion .....	23

## **Chapitre II**

### **L'origine des problèmes (solubilité fissuration et dynamique du processus) et mécanisme physico-chimique a l'origine du karst**

II.1. Introduction.....	24
II.2. L'histoire des terrains accueillant les réseaux karstiques.....	25
II.3. Le phénomène de karstification .....	27
II.4. L'origine des problèmes.....	28
II 4.1 Fissuration et solubilité .....	28
II.4.1.1. La Fissuration et l'Évolution Structurale du Karst.....	28
II.4.1.2. Origine des Fissures et Fractures .....	28
II.4.1.3. Rôle de la Fissuration dans le Processus Karstique .....	30
II 4.2. La Solubilité des Roches Carbonatées .....	31
II.4.2.1. Facteurs Influant la Solubilité .....	31
II.5. Les processus karstiques .....	32
II.5.1. Le stade initial de la karstification .....	32
II.5.2. Les stades ultérieurs .....	32
II.5.3. Une autre origine de la karstification : "les fantômes" .....	33
II.5.4. Corrosion.....	33
II.6. La dynamique de processus .....	35
II..7. Le potentiel de karstification.....	35
II..7.1. Le moteur .....	35

II.7.2. Le solvant .....	36
II.8.1. La karstification.....	37
II.8.1.1. La dissolution des roches carbonatées dépend de plusieurs facteurs .....	37
II.8.1.1.1. La nature de la roche .....	37
II.8.1.1.2. La teneur en CO <sub>2</sub> de l'eau .....	37
II.8.1.1.3. La température de l'eau .....	37
II.8.1.1.4 La pression .....	38
II.8.1.1.5. L'abondance en eau .....	38
II.8.1.1.6. Le temps de contact de l'eau avec la roche .....	38
II.8.1.2. L'emplacement de ces réseaux karstiques et leur développement sont fortement influencés par les caractéristiques suivantes.....	38
II.8.1.2.1. L'impluvium du point d'infiltration des eaux .....	38
II.8.1.2.2. La taille du bassin versant .....	38
II.8.1.2.3. La localisation des résurgences (!!! INVALID CITATION !!! ()) .....	39
II.8.1.2.4. Stratification et tectonique des terrains .....	40
II.8.2. La suffosion.....	40
II.9. Conclusion.....	42

### **Chapitre III**

#### **Contexte hydrogéologique ou hydrologique et impact sur les circulations d'eau**

III.1. Introduction.....	43
III.2. Définition de contexte hydrogéologique.....	43
III.3. Propriété hydrogéologique.....	43
III.4. Les spécificités hydrogéologiques du système karstique.....	43
III.5. Caractéristiques de contexte hydrogéologiques.....	46
III.5.1. Aquifères karstique .....	46
III.5.1.1. Les nappes karstiques .....	48
III.5.2. La perméabilité .....	49
III.6. Conclusion et perspective .....	50

**Chapitre IV****Les prospections géotechniques et géophysiques pour la détection des cavités karstiques**

IV.1. Introduction.....	51
IV.2. Les Prospections géotechniques .....	51
IV.2.1. Les forages de reconnaissance.....	52
IV.2.1.1. Objectif .....	54
IV.2.1.2. Principe de détection des zones karstique .....	55
IV.2.1.2.a. Présence de cavités ou de vides .....	55
IV.2.1.2.b. présence d'eau souterrain soudain .....	55
IV.2.1.2.c. perte de fluide de forage .....	55
IV.2.2. Le pénétromètre .....	55
IV.2.2.1. Principe et intérêt au karst .....	57
IV.2.2.2. Utilisation spécifique en karst .....	57
IV.2.2.3. Principe de détection des zones karstique. ....	57
IV.2.2.3.a. Changement brusque de la résistance .....	57
IV.2.2.3.b. Effondrement soudain de la tige .....	57
IV.2.2.3.c. Résistance anormalement faible en profondeur .....	58
IV.2.2.3. d. Manque de continuité entre les sondages .....	58
IV.2.1.1. Objectif de la méthode.....	58
IV.3. Prospection géophysique .....	59
IV.3.1. Les méthodes sismiques .....	59
IV.3.1.1. Sismique réfraction.....	61
IV.3.1.2. Sismique réflexion.....	63
IV .3.1.3. SASW .....	64
IV .3.2. Les méthodes électriques .....	64
IV .3.2.1. Profilés de résistivité .....	65
IV .3.2.2. Dispositifs classiques (Schlumberger, Wenner, dipôle-dipôle) .....	66
IV.3.3. Les méthodes électromagnétiques .....	68
IV.3.4. Les méthodes de La micro-gravimétrie .....	69

IV.4. Conclusion .....	72
------------------------	----

## Chapitre V

### **Incidences en termes de génie civil \_ (processus d'instabilité liés au karst. Exemples de cas : affaissements, effondrements, inondations et pollutions)**

V.1. Introduction.....	73
V. 2. Processus d'instabilité liés au karst.....	74
V.3. Types d'instabilité liés au karst.....	74
V.3.1. Affaissement progressif .....	74
V.3.2. Effondrement brutal .....	74
V.3.3. Inondations karstiques .....	76
V.3.4. Pollution rapide .....	77
V.4. Incidences en termes de génie civil : Processus d'instabilité liés au karst et exemples de cas .....	77
V.4.1. Affaissements et tassements du sol .....	77
V.4.1.1. Déformation des infrastructures .....	77
V.4.1.2. Instabilité des fondations .....	78
V.4.1.3. Dégradation des routes et des ponts .....	80
V.4.1.4. Endommagement des réseaux enterrés.....	80
V.4.1.5. Interruption de services .....	81
V.4.2. Effondrement.....	81
V.4.2.1. Destruction soudaine des infrastructures.....	81
V.4.2.2. Danger pour la sécurité publique.....	83
V.4.2.3. Fragilisation des constructions voisines .....	83
V.4.2.4. Réparations complexes et coûteuses.....	83
V.4.3. Inondations .....	83
V.4.3.1. Remontée d'eau soudaine par le sol .....	84
V.4.3.2. Réseaux d'évacuation souvent inefficaces .....	84
V.4.3.3. Dommages aux infrastructures .....	84
V.4.4. Pollution des nappes phréatiques .....	86
V.4.4.1. Présence de cavités et de failles.....	86

---

V.4.4.2. Absence de filtration naturelle.....	86
V.4.4.3. Circulation rapide de l'eau .....	87
V.4.4.4. Contamination des nappes phréatiques.....	87
V.4.4.5. Affaissements et instabilité des sols .....	87
V.4.4.6. Traitement difficile de l'eau .....	87
V.5. Les solutions adaptées.....	88
V.5.1. Effondrement .....	88
V.5.1.1. Études géophysiques et géotechniques.....	88
V.5.1.2. Remplissage des cavités avec des matériaux solides.....	88
V.5.1.3. Renforcement des structures existantes .....	88
V.5.1.4. Exclusion de construction dans les zones très instables .....	88
V.5.2. Affaissement.....	89
V.5.2.1. Fondations profondes (pieux ou micropieux).....	89
V.5.2.2. Injection de coulis de ciment (grouting).....	89
V.5.2.3. Surveillance régulière du sol avec capteurs.....	89
V.5.2.4. Étude géotechnique préalable .....	89
V.5.3. Solutions aux inondations.....	90
V.5.3.1. Systèmes de drainage adaptés au karst .....	90
V.5.3.2. Bassins de rétention .....	90
V.5.3.3. Pompes automatiques dans les tunnels et parkings .....	90
V.5.3.4. Surélévation des bâtiments sensibles.....	90
V.5.4. Solutions à la pollution .....	91
V.5.4.1. Étanchéité renforcée des réseaux.....	91
V.5.4.2. Protection des captages d'eau potable .....	91
V.5.4.3. Stations de traitement adaptées.....	91
V.5.4.4. Interdiction de certaines activités en amont des captages .....	91
V.6. Les cas en Algérie.....	92
V.7. Conclusion .....	94
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>95</b>

# Listes des figures

## Chapitre I

<b>Figure.I.1.</b> Exemple de paysage karstique près de Minerve, Hérault, France. (Genna & Capdeville, 2007). .....	4
<b>Figure.I.2.</b> Représentation synthétique d'un système karstique (Bakalowicz, 1995).....	5
<b>Figure.I.3.</b> L'aquifère karstique, [Source : d'après A. Mangin V]. .....	6
<b>Figure.I.4.</b> Cette doline est consécutive à l'effondrement d'un gouffre dans le gypse karstifié, au Sud de Madrid, dans le centre de l'Espagne.....	8
<b>Figure.I.5.</b> Le lapiaz de Loulle, Jura .(Fovet, Thomas, & Amad, 2015) .....	9
<b>Figure. I.6.</b> Représentation d'une diaclase (geoforum, 21 juin 2023) .....	10
<b>Figure.I.7.</b> Représentation d'un poljé (cantabria, 16 mai 2013).....	11
<b>Figure. I. 8.</b> Représentation d'une faille (gillard, 11 septembre 2021) .....	12
<b>Figure.I.9.</b> Représentation d'une grotte (LaurentGallien,2023). .....	13
<b>Figure.I.10.</b> Représentation schématique des systèmes karstique unaire et binaire (in Marsaud, 1996). .....	15
<b>Figure.I.11.</b> Exemples d'effondrements lié au karst – clichés Cerema et Brgm .....	17
<b>Figure.I.12.</b> Illustration 23 principe de détermination du niveau d'aléa karstique. (Noury et al., 2020) .....	19
<b>Figure.I.13.</b> Principe du croisement graphique de la prédisposition géologique et de la prédisposition karstique (Noury et al., 2020).....	22

## Chapitre II

<b>Figure.II.1.</b> Représente des illustrations de types de la roche (NOURY et al,2021).....	26
<b>Figure.II.2.</b> Illustration d'alternance de marne et de calcaire (NOURY et al,2021). .....	26
<b>Figure.II.3.</b> Schéma d'une karstification (d'AquaPortail, 19 juin 2009). .....	27
<b>Figure.II.4.</b> Réseaux de fissures et marques de racines dans lepikarst (Bakalowicz, 1995) .....	29
<b>Figure.II.5.</b> Genèse des formations karstiques. (Milanovic, 2004) .....	30
<b>Figure.II.6.</b> Schéma conceptuel du processus de karstification par fantomisation (Dubois, 2014) .....	33
<b>Figure.II .7.</b> Odessa photo (Husson et al., 2018) .....	34

<b>Figure.II.8.</b> Système karstique unaire ou binaire(AERMC, 1982).....	39
<b>Figure.II.9.</b> Différenciation entre réseau actif et réseau fossile (Clerveau, 2016).....	40
<b>Figure.II.10.</b> Schéma du principe d'entraînement de particules fines par suffosion.....	41
<b>Figure.II.11.</b> Coupe du Gouffre de Poudrey (Doubs)(Gilli, 1986).....	41

### Chapitre III

<b>Figure.III.1.</b> Schéma distinctif zone non-saturée / zone saturée (BRGM, 2018).....	45
<b>Figure.III.2.</b> Systèmes hydrogéologiques karstiques(Mischler et al., 2009).....	46
<b>Figure.III.3.</b> Représentation schématique d'un aquifère karstique(Dörfliger & Perrin, 2011) ...	48
<b>Figure.III.4.</b> Schéma d'une nappe karstique (BRGM, 2018).....	48

### Chapitre IV

<b>Figure.IV.1.</b> Photo d'un forage destructif (cerema, 6 août 2015).....	52
<b>Figure.IV.2.</b> Des échantillons remanés d'un forage destructif (gexplore, 14 decembre 2016)..	52
<b>Figure.IV.3.</b> Photo d'un le forage par carottage(fondasol, mars 2015).....	53
<b>Figure.IV.4.</b> Photo de carotte de forage(brgm, 2 juillet 2018) .....	53
<b>Figure.IV.5.</b> Exemple d'architecture de machine de forage(fondasol, mars 2015).....	54
<b>Figure.IV.9.</b> Schéma explicatif de pénétromètre dynamique .....	56
<b>Figure.IV.8.</b> pénétromètre dynamique lourd(SOLSOLUTION, 2023) .....	56
<b>Figure.IV.7.</b> Pénétromètre statique manuel portable(Apageo, 2020) .....	56
<b>Figure.IV.6.</b> Penetrometre statique de 100 KN (Apageo, 2020) .....	56
<b>Figure.IV.10.</b> Schéma explicatif de la méthode sismique(unit.eu, avril 2012) .....	60
<b>Figure.IV.11.</b> Schema de la sismique réfraction (unit.eu, avril 2012).....	62
<b>Figure.IV.12.</b> Schéma de principe de la sismique réfraction(geopat, mai 2010) .....	62
<b>Figure.IV.13.</b> Principe de la sismique réflexion .....	63
<b>Figure.IV.14.</b> Principe de la méthode électrique (gexplore, 14 decembre 2016).....	66
<b>Figure.IV.15.</b> Principe et dispositif de la méthode Electric (gexplore, 14 decembre 2016).....	67
<b>Figure.IV.16.</b> Principe de la méthode électromagnétique(unit.eu, avril 2012). .....	68
<b>Figure.IV.17.</b> Principe de la méthode de microgravimétrie (geopat, mai 2010).. .....	70

## Chapitre V

<b>Figure.V.1.</b> Schéma explicative d'un effondrement (ONEMA BRGM, 2010).....	75
<b>Figure.V.2.</b> Effondrement à Gagny en 1974 (Barres & Lallemand-Barrès, 1988).....	76
<b>Figure.V.4.</b> Différentes pollutions pouvant affecter un massif calcaire (campagne de sensibilisation CNPSS-1988).....	77
<b>Figure.V.5.</b> inclinaison célèbre de la tour de pise due à un affaissement du terrain marneux (Donato, 23 decembre 2010).....	78
<b>Figure.V.6.</b> Affaissement de la fondation et dallage(GEOSEC, 2018) .....	79
<b>Figure.V.7.</b> Affaissement et fissure de la fondation(BEBEXPERTS, 25 mars 2019).....	79
<b>Figure.V.8.</b> Une route affaissée en Mayenne(FRANCE, 25 janvier 2021) .....	80
<b>Figure.V.9.</b> Effondrement karstique a Guatemala 2013(plume-webmag, 2019).....	81
<b>Figure.V.11.</b> le pont de Chamborigaud s'est effondré le 18 mars 2024(Casez, 2024).....	82
<b>Figure.V.10.</b> Effondrement à Saint-Pryvé-Saint-Mesmin en 2010 (45) - cliché DDT45(E. Husson, 2010). .....	82
<b>Figure.V.12.</b> Dégâts des inondations à Pepinster (Belgique) .....	85
(Christophe Licoppe, 17 July 2021).....	85
<b>Figure.V.12.</b> Un tunnel inondes à Kinkempois(hartia, 21 juillet 2021).....	85
<b>Figure.V.13.</b> Effondrement karstique de la region de boukadir (chlef) en 1988(lalgerieaujourd'hui, 2022).....	92
<b>Figure.V.14.</b> Les 2 grandes d'effondrement de la zone d'étude. A gauche : la doline d'effondrement de la RN4 (Photo prise par Pr. Mostefa GUENDOOUZ le 16/06/1988). A droite : le Bir Djeneb dans les monts carbonatés Ouarsenis .....	93
<b>Figure.V.16.</b> Grotte karstique de Ghar boumazaa(Ainouche, 2025) .....	93
<b>Figure.V.15.</b> Grotte karstique de Ghar boumazaa(Ainouche, 2025) .....	93

# **Introduction**

## **Introduction générale**

La géotechnique est une discipline fondamentale du génie civil qui étudie le comportement des sols et des roches dans le cadre de projets de construction et d'aménagement. Elle joue un rôle crucial dans la conception, la réalisation et la sécurité des ouvrages, qu'il s'agisse de bâtiments, de routes, de barrages ou d'infrastructures offshore.

Une infrastructure est un ensemble d'installations et d'équipements qui permet le fonctionnement et le développement d'une activité ou d'un territoire.

De manière globale, les infrastructures jouent un rôle essentiel dans le développement économique et social d'un pays, en matière d'aménagement et d'économie mais également d'un point de vue immobilier. Celles-ci contribuent à la mobilité, à l'accès aux services, à la sécurité et à la qualité de vie.

Les projets d'infrastructures en zones karstiques représentent un défi majeur en raison des caractéristiques géologiques particulières de ces terrains. Ces zones, façonnées par la dissolution des roches carbonatées, se distinguent par une structure complexe, souvent instable, qui peut inclure des cavités souterraines, des effondrements et des circulations d'eau imprévisibles. Ces phénomènes naturels, combinés aux pressions anthropiques, augmentent significativement les risques d'aléas susceptibles d'affecter la durabilité et la sécurité des ouvrages.

Au cours de ces dernières années, divers outils et technique sont apparus afin d'aider l'ingénieur à solutionner les problèmes liés aux différents ouvrages et construction en génie civil.

La problématique de ce mémoire est d'étudier les risques dans les projets d'infrastructure en zone karstique. Ce travail vise à approfondir les connaissances sur les processus qui influencent les terrains karstiques et leurs implications sur les projets d'infrastructure et, à fournir une analyse complète des risques et à proposer des solutions pour minimiser ces risques, tout en garantissant la durabilité et la sécurité des ouvrages.

Le plan de ce mémoire est organisé en cinq chapitres :

- **Chapitre 1** : Le mémoire propose premièrement, une définition géologique du karst ainsi qu'une présentation des principaux aléas karstiques. Cette étape est cruciale pour établir les bases nécessaires à la compréhension des risques associés à ces terrains.
- **Chapitre 2** : Deuxièmement, l'analyse s'intéresse à l'origine des problèmes liés au karst, en examinant les processus physico-chimiques responsables de la dissolution des roches de la formation des cavités. Ces mécanismes, à la base des instabilités, sont étudiés en détail pour mieux en appréhender les conséquences.
- **Chapitre 3** : Il s'intéresse au contexte hydrogéologique, en mettant en lumière l'impact des circulations d'eau sur la stabilité des sols et des infrastructures. Cette partie analyse les interactions entre les dynamiques hydrologiques et les risques structurels.
- **Chapitre 4** : Une attention particulière est portée aux méthodes de prospection géotechniques et géophysiques dans ce chapitre, indispensables pour anticiper les aléas et guider la conception des infrastructures dans ces environnements complexes et karstiques.
- Par ailleurs, le mémoire explore les incidences des phénomènes karstiques en génie civil, en illustrant les principaux risques tels que les affaissements, les effondrements, les inondations et la pollution. Des exemples concrets permettent de mieux comprendre les enjeux pratiques auxquels les ingénieurs sont confrontés.
- **Chapitre 5** : Ce chapitre explore les incidences des phénomènes karstiques en génie civil, en illustrant les principaux risques tels que les affaissements, les effondrements, les inondations et la pollution. Des exemples concrets permettent de mieux comprendre les enjeux pratiques auxquels les ingénieurs sont confrontés.

Le mémoire se termine par une conclusion générale et une bibliographie assez riche et d'actualité.



## **Chapitre I**

**Définition géologique du karst \_ définition de  
l'aléa karstique.**

## **I.1. Introduction**

Le karst est un paysage géologique résultant de la dissolution des roches solubles, principalement le calcaire, le gypse et la dolomie, sous l'effet de l'eau. Ce processus génère des formations caractéristiques telles que des dolines, des gouffres, des rivières souterraines et des grottes. Le développement du karst repose sur l'action conjointe de l'eau et du temps, conduisant à une morphologie souterraine et de surface particulière.

Les cavités souterraines génèrent un risque de mouvements de terrain pouvant remettre en cause la sécurité des biens et des personnes se trouvant en surface. Les cavités anthropiques (mines, carrières, caves, sapes de guerre, etc.) font l'objet de nombreux documents techniques pour la gestion de ce risque, depuis leur détection jusqu'à leur mitigation, et ce à toutes les échelles d'étude. Les cavités naturelles présentent quant à elles des particularités impliquant d'adapter les raisonnements et les pratiques. Les risques liés à la dissolution du gypse ont ainsi récemment fait l'objet d'un guide édité par l'Ineris et le Cerema (Charmoille et al., 2018).

Les roches carbonatées karstiques sont le siège de phénomènes encore différents pouvant aboutir, suivant divers processus, à des effondrements ou des affaissements. La compréhension de ces instabilités impose une analyse pluridisciplinaire. L'histoire géologique en est en effet la clé d'entrée (présence/absence de cavités, configuration des vides et du substratum), mais elle ne suffit pas à elle seule à expliquer les mouvements observés en surface. Il faut pour cela également prendre en compte le comportement géotechnique des matériaux remplissant ou recouvrant la roche carbonatée et le rôle de l'eau, que ce soit celle présente à la surface, ou celle baignant le sol et/ou le sous-sol. (Noury et al., 2020).

## **I.2. Définition du karst**

Le mot karst est d'origine slovène et correspond à un ensemble géographique situé au nord de Trieste. Selon la discipline, le mot karst peut relever de différentes définitions. Les régions karstiques sont aujourd'hui bien identifiées à l'échelle mondiale. La notion de karst est connue depuis l'Antiquité, mais le développement de la spéléologie remonte à la 2ème moitié du XIXe siècle. Les roches à l'origine des phénomènes karstiques sont aujourd'hui bien connues et c'est la dissolution du calcaire qui est à l'origine de la majorité des formes karstiques. Sans oublier toutefois d'autres types de roches comme les évaporites ou les roches siliceuses qui conduisent à des modelés dénommés parakarsts. (Mihevc, 2007).

### I. 3. Définition géologique du karst

Le karst désigne un paysage comprenant des formes superficielles (dolines, poljés, canyons, vallées sèches...) et des formes souterraines (grotte, galeries, réseaux...) associé à un régime hydrologique spécifique. (Noury et al., 2020).



**Figure. I.1.**Exemple de paysage karstique près de Minerve, Hérault, France.  
(Genna & Capdeville, 2007).

Bien connu et décrit comme un paysage, le **karst** est une formation géologique établie dans les roches **carbonatées**, calcaires et dolomies. C'est avant tout un **aquifère**, formation dans laquelle l'eau souterraine s'accumule, circule et émerge à des sources souvent importantes. Il constitue souvent des réservoirs d'eaux souterraines remarquables et très particuliers (Chen, Z et al ; 2017).

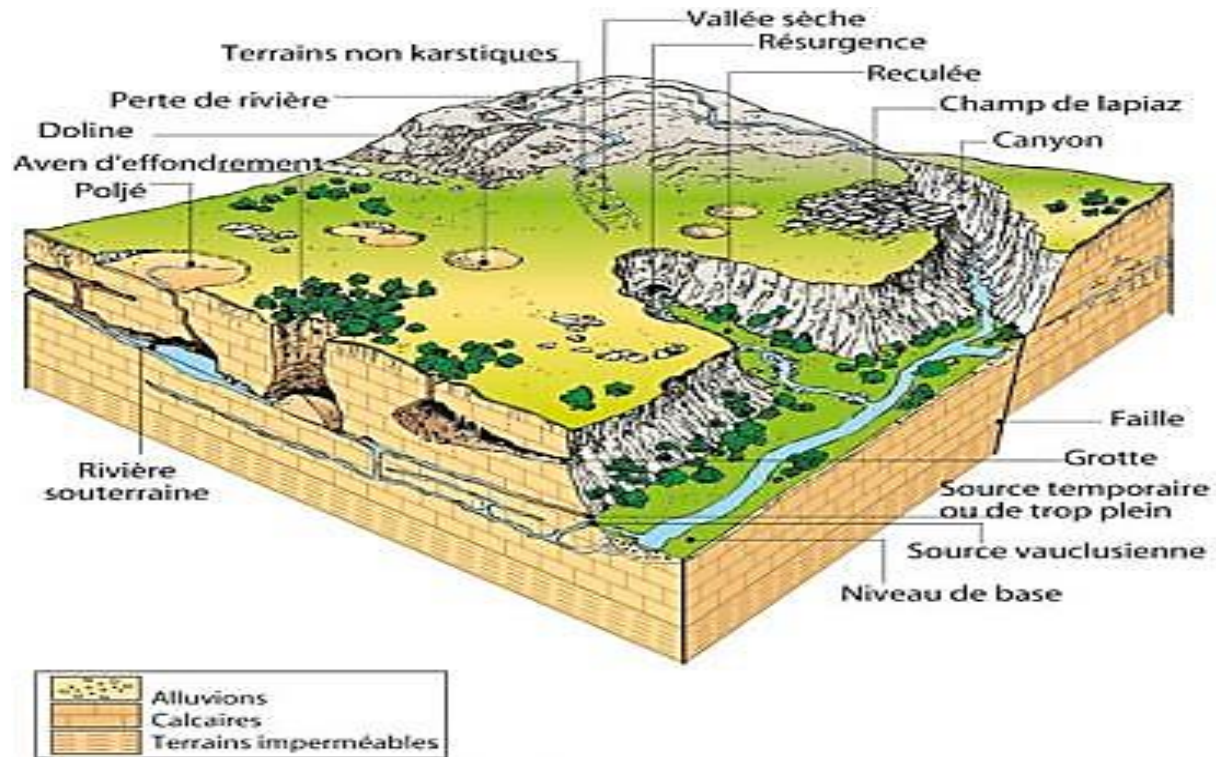


Figure.I.2.Représentation synthétique d'un système karstique (Bakalowicz, 1995).

Le karst est donc d'abord un système hydrologique aquifère, et pas seulement un paysage. Modélé en fonction des écoulements souterrains, avec des dépressions fermées et des gouffres, lieux d'absorption préférentielle, le paysage de surface peut présenter des restes d'une organisation fluviale d'écoulements passés, comme des vallées sèches et des placages alluviaux. Cette organisation est progressivement démantelée au profit d'une circulation souterraine dans des fractures et des conduits de tailles variables.(El-Hakim & Chauvin, 2004).

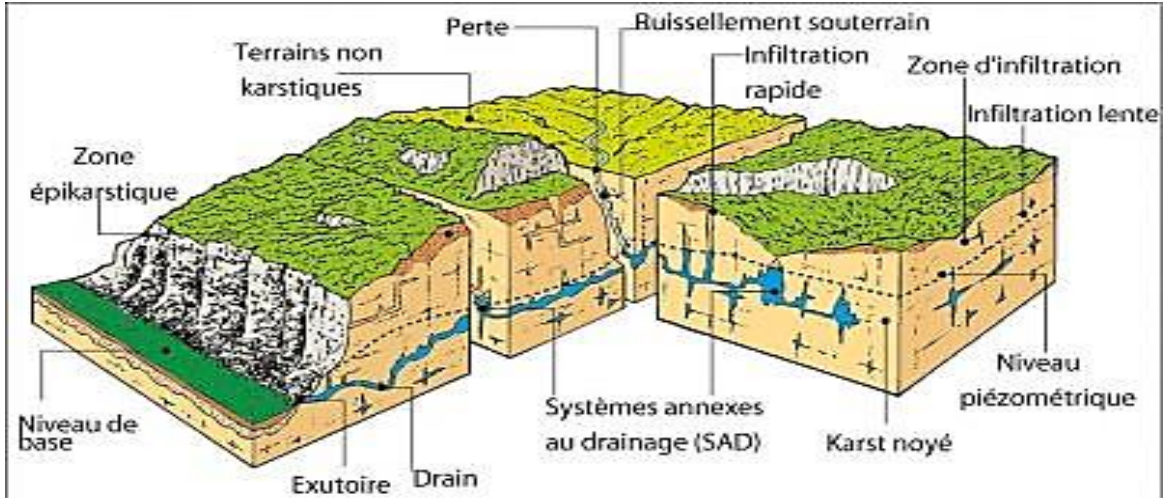


Figure. I.3. L'aquifère karstique, [Source : d'après A. Mangin V].

### I.3.1. Géomorphologie.

Une définition plus large englobe tous les types de roches solubles capables d'absorber l'eau, de se dissoudre en profondeur et de former des cavités durables. Pour que ce processus ait lieu, la roche doit posséder une résistance mécanique suffisante afin d'éviter un effondrement immédiat et permettre l'évacuation des minéraux dissous hors du système.

Ces notions sont essentielles pour distinguer le karst des autres types de paysages. Bien que la dissolution de surface puisse affecter divers types de roches, notamment dans les zones intertropicales où le basalte et le granite s'altèrent facilement, l'action de l'eau y reste limitée en profondeur. En effet, dans ces milieux, les cavités nouvellement formées se remplissent rapidement de débris issus de l'effondrement ou de l'altération, empêchant ainsi leur développement à grande échelle. (Gilli, 2015).

Certaines roches non carbonatées, comme le gypse, les sels et certains grès, étant solubles, peuvent donner naissance à des paysages similaires. Bien que le terme karst soit parfois employé pour les désigner, parakarst est plus approprié. Par ailleurs, dans les régions périglaciaires, l'eau chaude peut provoquer l'ouverture de cavités et entraîner la formation de thermokarsts.

### I.3.2. Hydrogéologie.

Le karst résulte de l'interaction de l'eau avec les roches, aussi bien en surface qu'en profondeur, et peut donc être analysé sous un angle hydrogéologique. Dans ce contexte, il correspond à une formation calcaire où le réseau hydrographique de surface est en partie ou totalement absorbé par

le sous-sol. L'eau y circule à travers le calcaire, donnant naissance à des aquifères qui alimentent des sources. L'ensemble comprenant la zone d'infiltration, les aquifères et les sources constitue ce que l'on appelle un système karstique (Gilli, 2015).

### **I.3.3. Thermodynamique.**

Le karst peut aussi être analysé sous un prisme thermodynamique, en considérant l'énergie impliquée dans sa formation. L'eau façonne la roche en surface, s'infiltré en profondeur, modifie le substrat rocheux, puis resurgit sous forme de sources. Ce processus en fait un système dynamique soumis aux lois de la thermodynamique (Gilli, 2015).

Dans ce cadre, les fluides transportent de l'énergie mécanique et chimique à travers un milieu solide qui dissipe cette énergie. Le fonctionnement du système repose sur l'énergie cinétique de l'eau, induite par le gradient hydraulique, ainsi que sur l'énergie chimique liée à la dissolution du calcaire (Mangin, 1975).

À un niveau plus fondamental, ce système est entièrement alimenté par le soleil, moteur du cycle de l'eau. Ainsi, bien que souterraines, les grottes – éléments emblématiques du karst – sont en quelque sorte une création indirecte du soleil ! (Gilli, 2015).

## **I.4. Les formes du karst.**

Les caractéristiques morphologiques du karst illustrent la complexité et la beauté des paysages karstiques, ces formations géologiques jouent un rôle crucial dans l'écologie, la gestion de l'eau et la compréhension des processus géologiques.

### **I.4.1. Formes karstiques en surface.**

#### **I.4.1.1. Doline.**

Les dolines ou dolines de dissolution sont une caractéristique essentielle des paysages karstiques, tant sur le plan de l'hydrologie que de la morphologie. Ce sont des dépressions fermées, plus ou moins circulaires, qui varient par leur apparence et leur taille. Elles parsèment la surface des régions karstiques, et parfois, elles apparaissent à des densités si élevées qu'elles se rejoignent. Elles forment une multitude de petits bassins endoréiques qui collectent les eaux pluviales et agissent comme des entonnoirs naturels (Nicod, 1991a).

Les dolines peuvent également accumuler une couverture de sol dans leurs fonds plats. Dans les karsts méditerranéens, elles sont souvent les seuls endroits cultivables parmi des champs de lapiés où la roche nue est stérile.

En raison de leur nature omniprésente, les dolines ont fait l'objet de nombreuses études et ont donné lieu à divers systèmes de classification basés sur leur apparence, leur genèse ou leur fonction hydrologique (Nicod, 1991b).



**Figure.I.4.** Cette doline est consécutive à l'effondrement d'un gouffre dans le gypse karstifié, au Sud de Madrid, dans le centre de l'Espagne.

#### **I.4.1.2. Le lapiaz**

Également appelés karren, sont des formations résultant de l'altération du calcaire à petite échelle, allant de quelques millimètres à plusieurs mètres. Ils peuvent se développer en surface ou sous une couverture de sol, donnant lieu à une grande diversité de formes.

Ces structures ont été largement étudiées (Cvijic, 1918); (Bögli & Bögli, 1980) ; White, 1988) et ont fait l'objet de diverses classifications en fonction de leurs caractéristiques morphologiques. (Nicod, 1972) et (Niering et al., 2000) ont proposé une typologie fondée sur les processus de formation, distinguant ainsi les lapiés subaériens, les lapiés couverts et les lapiés biologiques.



**Figure. I.5.** Le lapiaz de Loulle, Jura .(Fovet, Thomas, & Amad, 2015)

#### **I.4.1.3. La diaclase.**

Est une cassure affectant la roche sans qu'il n'y ait de déplacement des deux blocs rocheux ainsi séparés. Les diaclases apparaissent quand les contraintes qui agissent sur la roche (pressions, mouvements tectoniques...) dépassent ses capacités de déformation de cette roche. Permettant le passage de l'eau, la diaclase rend la roche sensible à l'érosion chimique (dissolution) ou mécanique (cryoclastie du fait de l'alternance des gels et des dégels) (Sanguinetti, 1995).



**Figure. I.6.** Représentation d'une diaclase (geoforum, 21 juin 2023)

#### I.4.1.4. Le poljé.

D'origine slave, le mot poljé signifie plaine. Ces vastes dépressions constituent un élément essentiel des paysages karstiques et, avec le fond des grandes dolines, figurent parmi les rares zones adaptées à une agriculture à grande échelle.

Introduit par (Cvijić ;1911), le terme désigne des bassins endoréiques où le ruissellement de surface s'infiltré dans le substrat karstique à travers des grottes, gouffres ou entonnoirs d'absorption, appelés également ponors, swallow-holes ou swallets.

Le fonctionnement hydrologique des poljés obéit à des dynamiques spécifiques, qui façonnent des formes de relief caractéristiques. Lorsque le débit d'un cours d'eau augmente (Cvijić, 1911).



**Figure. I.7.** Représentation d'un poljé (cantabria, 16 mai 2013)

#### I.4.1.5. La faille.

Est une cassure affectant la roche et montrant un déplacement relatif des deux blocs rocheux ainsi séparés. Peut faciliter l'infiltration de l'eau en profondeur, les failles agissent souvent comme des zones de faiblesse ou l'eau peut s'engouffrer (Salvi, 1979).



**Figure. I.8.** Représentation d'une faille (gillard, 11 septembre 2021).

#### **I.4.1.6. Epikarst.**

La surface et les bordures d'un massif rocheux subissent une décompression, entraînant l'apparition de discontinuités telles que des plans de stratification ou des fractures de décompression. Cette zone distincte du paysage correspond à l'épikarst. Son développement peut être étudié à travers l'analyse des pentes d'éboulis et des parois de carrières, ainsi que par l'utilisation du radar à pénétration de sol (Vouillamoz et al., 2003). Selon les conditions locales, le substrat rocheux peut être directement exposé ou recouvert d'un sol d'épaisseur variable, avec un couvert végétal plus ou moins dense.

L'érosion causée par l'eau se manifeste aussi bien en surface qu'en profondeur, où elle peut atteindre plusieurs mètres. L'eau s'infiltré à travers les discontinuités de la roche et interagit avec le substrat soit par ruissellement direct, soit en saturant le sol, qui joue alors un rôle de compresse sur la roche (Gilli, 2015).

#### **I.4.2. Les formes karstiques souterraine (endokarst).**

##### **I.4.2.1. Les galeries et les réseaux souterrains**

Les galeries et réseaux souterrains sont des passages naturels formés par l'érosion chimique des roches calcaires sous l'action de l'eau. Au fil du temps, l'infiltration de l'eau dissout progressivement la roche, creusant des tunnels qui peuvent être parcourus par des rivières

souterraines. Ces réseaux varient en taille et en complexité, allant de simples conduits isolés à d'immenses labyrinthes souterrains s'étendant sur plusieurs kilomètres. Certains de ces réseaux servent de réservoirs d'eau, tandis que d'autres abritent des écosystèmes uniques adaptés à l'obscurité et à l'humidité. Leur exploration permet de mieux comprendre la formation des paysages karstiques et l'hydrologie souterraine (Gilli, 2015).

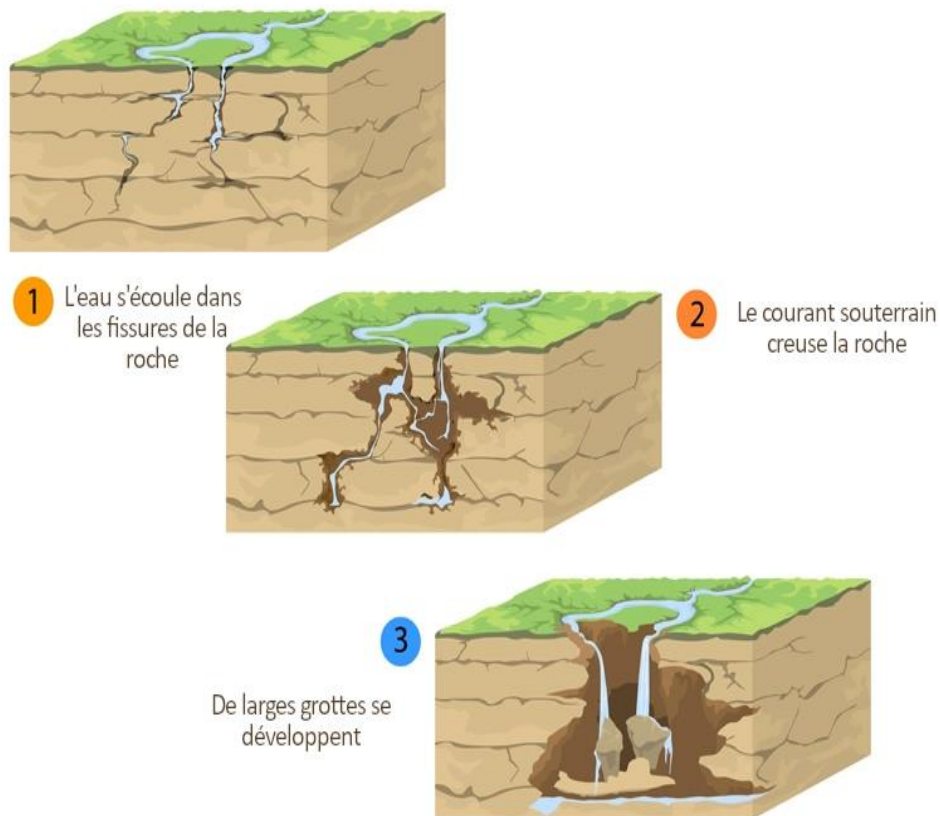
#### I.4.2.2. Les grottes et cavernes

Les grottes et les cavernes sont des cavités souterraines résultant de la dissolution progressive des roches calcaires par l'eau. Ce phénomène naturel, qui peut durer des milliers voire des millions d'années, façonne des espaces de tailles très variées. Certaines grottes se limitent à de simples galeries étroites, tandis que d'autres forment d'immenses réseaux interconnectés, avec des salles vastes et spectaculaires. Ces formations souterraines abritent souvent des paysages uniques, comme des stalactites et des stalagmites, créés par la circulation et la précipitation des minéraux dissous dans l'eau. Elles jouent également un rôle important dans l'étude des environnements souterrains et de l'histoire géologique (Gilli, 2015).



**Figure. I.9.** Représentation d'une grotte (LaurentGallien,2023).

Dans certaines grottes, l'eau continue de circuler à travers les galeries, donnant naissance à des rivières souterraines qui façonnent le paysage au fil du temps. Ces cours d'eau peuvent être temporaires ou permanents, selon les conditions hydrologiques et géologiques. Par endroits, l'eau peut s'accumuler et former des lacs souterrains, souvent spectaculaires, où l'eau stagnante reflète les parois rocheuses. Ces milieux, parfois isolés de la surface pendant des millénaires, abritent des écosystèmes uniques, adaptés à l'obscurité et aux faibles ressources en nutriments. L'étude de ces environnements permet de mieux comprendre les circulations d'eau souterraines et leur rôle dans le modelage des paysages karstiques (Gilli, 2015).



**Figure.I.10.** Représentation schématique des systèmes karstiques Jurassien et Vaclusien (Marsaud, 1996).

### I.5. Les différents types de karsts

Selon la nature de l'impluvium ou la zone d'alimentation on distingue deux types de Karsts

### I.5.1. Les karsts unaires

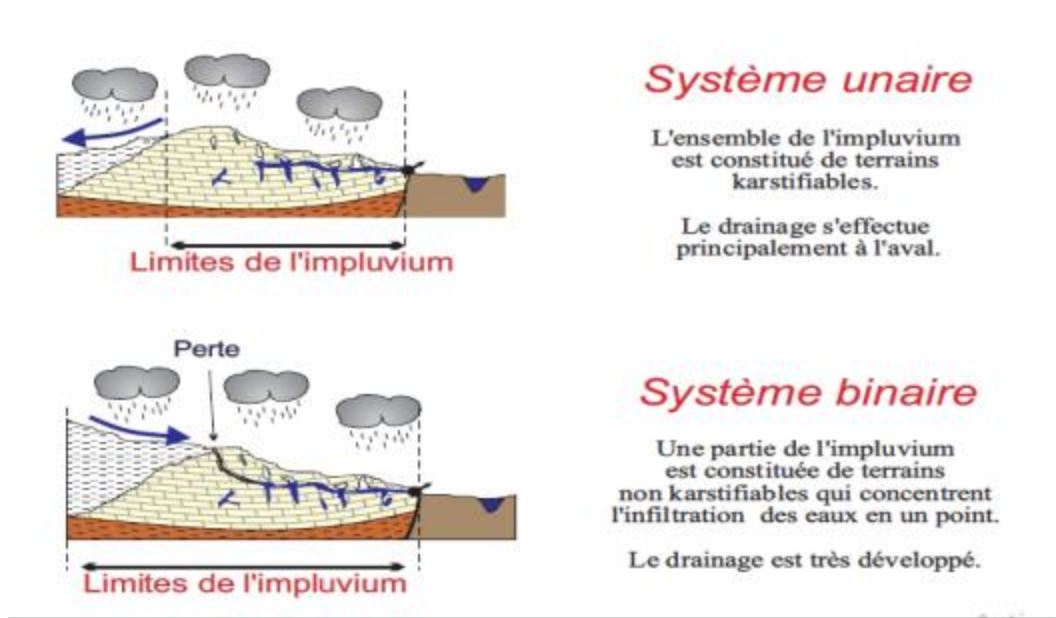
Pour lesquels l'ensemble de l'impluvium est constitué de terrains karstiques. Dans ce

Cas l'infiltration a lieu partout,

### I.5.2. Les karsts binaires

Qui possèdent des terrains imperméables et non karstiques dans leurs bassins D'alimentation. Ces milieux sont le siège d'écoulements de surface qui pénètrent dans L'aquifère à travers les pertes situées entre les deux types de formations (in Marsaud, 1996).

L'impluvium non karstique joue un rôle important dans l'accélération et l'augmentation Du développement de la structure de drainage grâce à la concentration de l'énergie disponible En un point.



**Figure. I.11.** Représentation schématique des systèmes karstique unaire et binaire (in Marsaud, 1996).

Selon le processus de genèse (karstogenèse), on peut distinguer différents types de Karst (Bakalowicz, 1996 ; Plagnes, 1997).

### I.5.3. Les karsts classiques

Qui ont pour origine des écoulements gravitaires et du CO<sub>2</sub>d'origine pédologique.

**I.5.4. Les karsts sulfuriques**

Qui ont pour origine des écoulements gravitaires ou sont liés à des gradients de Température, et la présence d'acide sulfurique (H<sub>2</sub>S).

**I.5.5. Les karsts profonds ou hydrothermaux**

Qui sont d'origine hydrothermale. Les moteurs de la karstification sont le dégagement De CO<sub>2</sub> d'origine profonde et les gradients thermiques élevés.

**I.5.6. Les karsts littoraux**

Qui sont formés par l'interaction eau douce – eau salée sur la roche carbonatée. Les Écoulements sont produits en partie par gradient de densité avec la possibilité de dissoudre Grâce au mélange. Ils ne doivent pas être confondus avec les sources karstiques d'eau douce Sous-marines.

**I.5.7. Les karsts jurassiens**

Pour lesquels le réseau de drainage s'organise à proximité du niveau de l'exutoire.

L'écoulement peut y être localement libre, donc sans continuité hydraulique de l'aval vers L'amont dans la zone noyée (Marsaud, 1996).

**I.5.8. Les karsts vauclusiens**

Où la karstification se développe en profondeur, sous le niveau de base.

**I.6. Définition de l'aléa karstique**

L'aléa karstique est un phénomène géologique et géomorphologique lié à la présence de terrains calcaires solubles dans l'eau, qui subissent une dissolution progressive sous l'action des eaux souterraines (Abou Akar & Lafforgue, 1994).

Ce processus entraine la formation de cavités souterrains, de réseaux hydrauliques complexe et de dépression en surface.

Les mouvements de terrain liés au karst prennent la forme, en surface, soit d'effondrement (rupture brutale et marquée), soit d'affaissement (déformation plus souple), avec une forme très souvent circulaire (Margat & Torrent, 1992).

Les dimensions de ces évènements sont généralement décrites en terme de diamètre et de profondeur. Elles varient toutes les deux de quelques décimètres à plusieurs mètres.

Les phénomènes d'effondrement et de tassement surviennent quand du calcaire, du gypse ou de la roche salifère sont attaqués et partiellement dissous ou érodés par des circulations d'eau. Les cavités créées peuvent s'effondrer et conduire à un affaissement progressif ou à un effondrement subit de la surface du terrain.



**Figure. I.12.** Exemples d'effondrements lié au karst – clichés Cerema et Brgm

Les différentes morphologies des paysages karstiques induisent la présence de nombreux

Aléas tels que :

- les effondrements ;
- les affaissements ;
- les glissements (dolines en bordure de marnes) ;
- les inondations ;
- les coulées boueuses ;
- les chutes de blocs ;
- les pollutions ;
- le retrait-gonflement des argiles.

## I.7. Méthodologie d'évaluation de l'aléa

### I.7.1. Caractérisation du secteur étudié

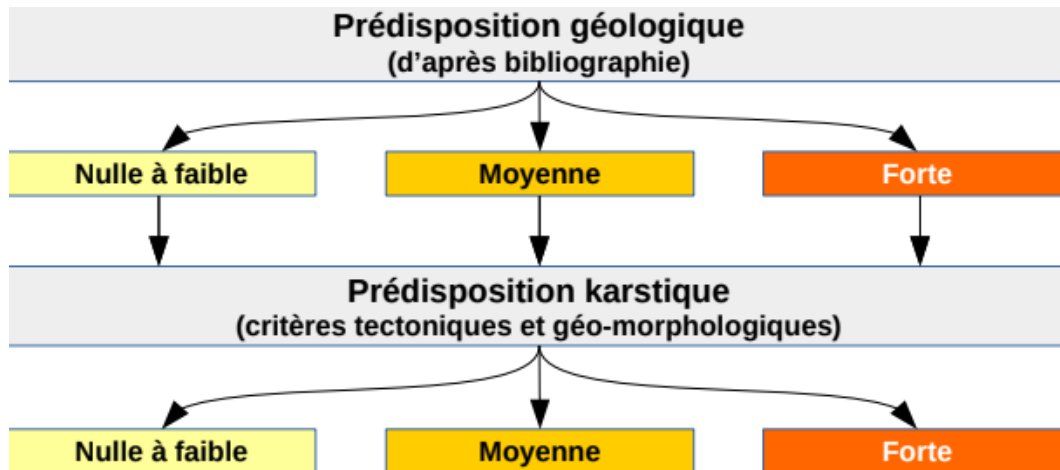
La première étape du travail consiste à collecter le maximum de données possibles : carte géologique, topographique, piézométrique, Modèle Numérique de Terrain, coupe géologique (sondage, affleurement), lever spéléologique, article et ouvrage de référence, inventaire des cavités et des mouvements de terrain, etc. La représentation de ces données se fait classiquement sous la forme d'une ou de plusieurs cartes « informatives » qui serviront ensuite pour les extrapolations / interpolations pour les zones mal renseignées (Clerveau, 2016).

### I.7.2. Evaluation de la prédisposition aux mouvements de terrain

La détermination du niveau d'aléa se fait en 2 temps.

L'aptitude d'un terrain à être karstifié est basée sur une prédisposition géologique (roches solubles). Il est possible de déterminer des niveaux de prédisposition géologique, de forte à nulle (illustration n°23) (Noury et al., 2020).

Dans un second temps, il est utile d'ajouter des considérations tectoniques et géomorphologiques, ce qui sera nommé la prédisposition karstique et à laquelle un niveau d'aléa est associé (illustration n°23) (Noury et al., 2020).



**Figure. I.13.** Illustration 23 principe de détermination du niveau d'aléa karstique. (Noury et al., 2020)

**I.7.2.1. Prédisposition géologique**

Pour chaque étage géologique (approche stratigraphique et non lithologique), ont été recensés les indices tels que les désordres (dolines), les grottes, les gouffres, les sources et les pertes. Une étude statistique non exhaustive a ainsi été réalisée afin d'identifier les niveaux lithologiques karstifiables. Les indices pris en compte ont été extraits des cartes géologique et topographiques, ainsi que des bases de données du BRGM (BD-MVT et BD-CAVITES).

Pour chaque étage et pour chaque type d'indice karstique (désordres, grottes, gouffres, sources et pertes), ont ensuite été calculés la proportion d'indice par rapport à la totalité des indices (colonne « relatif en % » du tableau n°1) ainsi que la densité de ces indices par kilomètre-carré des terrains attribué à l'étage géologique correspondant (tableau n°1). Concernant les transitions entre étages, la densité a été calculée pour une bande de 100 mètres de large au droit de la limite stratigraphique.(Noury et al., 2020)

unité lithologique	surface (km <sup>2</sup> )	désordres			grottes			gouffres			sources			pertes		
		Absolu	Relatif (%)	Densité (/km <sup>2</sup> )	Absolu	Relatif (%)	Densité (/km <sup>2</sup> )	Absolu	Relatif (%)	Densité (/km <sup>2</sup> )	Absolu	Relatif (%)	Densité (/km <sup>2</sup> )	Absolu	Relatif (%)	Densité (/km <sup>2</sup> )
J <sub>8</sub>	0,15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
J <sub>7</sub> /J <sub>8</sub>	0,15	1	1	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
J <sub>7</sub>	0,88	5	3	6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
J <sub>6</sub> /J <sub>7</sub>	0,15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
J <sub>6</sub>	0,78	11	6	14	-	-	-	-	-	-	2	18	2,6	-	-	-
J <sub>5</sub> /J <sub>6</sub>	0,26	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
J <sub>5</sub>	0,43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
J <sub>4</sub> /J <sub>5</sub>	0,21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
J <sub>4</sub>	0,45	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
J <sub>3</sub> /J <sub>4</sub>	0,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
J <sub>3</sub>	0,15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
J <sub>2</sub> /J <sub>3</sub>	0,2	2	1	10	-	-	-	-	-	-	5	45	25	-	-	-
J <sub>2</sub>	2,41	18	10	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
J <sub>1b</sub> /J <sub>2</sub>	0,76	18	10	24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
J <sub>1b</sub>	2,71	58	32	21	-	-	-	1	50	0,4	-	-	-	-	-	-
J <sub>1a</sub> /J <sub>1b</sub>	0,56	11	6	20	1	100	2	-	-	-	1	9	1,8	1	100	1,8
J <sub>1a</sub>	4,09	55	30	13	-	-	-	1	50	0,2	-	-	-	-	-	-
I <sub>ca</sub> /J <sub>1a</sub>	0,7	3	2	4	-	-	-	-	-	-	1	9	1,4	-	-	-
I <sub>ca</sub>	1,29	5	3	4	-	-	-	-	-	-	2	18	1,6	-	-	-
total	15,3	181	100		1	100		2	100		11	100		1	100	

**Tableau. I.1.** Étude statistique non exhaustive des indices karstiques par étage géologique l'intensité de la coloration des cases permet de visualiser l'importance de la karstification par niveau stratigraphique. L'intensité de la couleur attribuée aux case correspond au niveau d'importance relative et de densité de chaque type d'indice ; à savoir

Densité >= 20 % 20 % > Densité >= 10 % > 20 indices >= 10 indices (Noury et al., 2020).

Le niveau de prédisposition géologique est déterminé par rapport à la densité d'indices (tableau2).

Densité d'indices	Prédisposition géologique
$\geq 10$	Forte
$0 < \leq 9$	Moyenne
0	Faible à nulle

**Tableau. I. 2.** le critère de détermination du niveau de prédisposition géologique. (Noury et al., 2020).

### I.7.2.2. Principe de détermination de la prédisposition karstique

Les critères tectoniques et géomorphologiques utilisés pour la détermination de niveau d'aléa karstique sont les suivants :

- présence de failles (avérées ou supposées) : un couloir de faille est une zone linéaire, rectiligne ou présentant des courbes, fracturée et diaclasée, dont la perméabilité est localement très forte ;
- présence de dolines ;
- présence de sources ;
- présence de pertes ;
- surface en contact direct avec la partie active des réseaux karstiques.

Ainsi, les zones sensibles vis à vis de la prédisposition karstique sont les zones de dolines, les zones d'alimentation et les exutoires des réseaux actifs (Noury et al., 2020).

#### • Les dolines

Les dolines sont des dépressions dont le bord est ici défini comme la rupture de pente (Noury et al., 2020).

#### • Les zones d'alimentation des réseaux actifs

Des zones d'alimentation du réseau correspondent à deux cas :

- les parties marneuses donc imperméables (réseau type binaire) ;

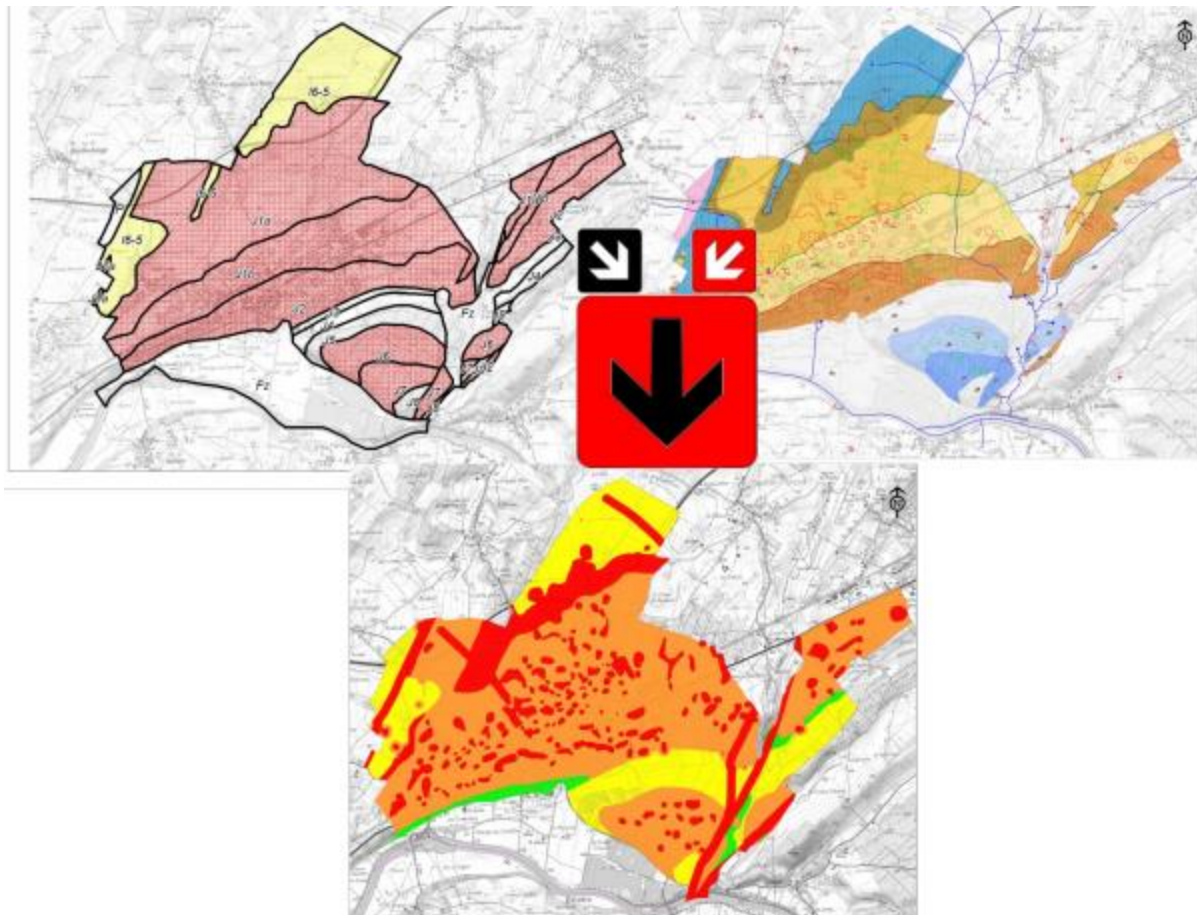
- les zones de concentration des eaux de ruissellement (réseau type uniaire), à la limite entre des calcaires de nature différente, donc limite marquée par un creux topographique (Noury et al., 2020).

- **Les exutoires des réseaux actifs**

La puissance de la partie exutoires des réseaux actifs a été déterminée directement en traçant les zones de sources au pied des talus calcaires (Noury et al., 2020).

## I.8. Les niveaux d'aléa karstique

Le niveau d'aléa karstique est déterminé par croisement de la prédisposition géologique et de la prédisposition karstique. Le zonage d'aléa karstique est déterminé par croisement graphique des prédispositions (illustration 29)(Noury et al., 2020).



**Figure. I.14.** principe du croisement graphique de la prédisposition géologique et de la prédisposition karstique (Noury et al., 2020).

Ainsi, quatre niveaux d'aléa sont définis :

- les zones rouges, correspondant aux parties du territoire soumis à un aléa karstique fort ;
- les zones oranges, correspondant aux parties du territoire soumis à un aléa karstique moyen ;
- les zones jaunes, correspondant aux parties du territoire soumis à un aléa karstique faible ;
- les zones vertes, correspondant aux parties du territoire au droit des exutoires des réseaux actifs.

Aléa affaissement / effondrement		Prédisposition géologique					
		Forte		Moyenne		Faible	
		réseau actif	réseau fossile (*)	réseau actif	réseau fossile (*)	réseau actif	réseau fossile (*)
Géomorphologie	À l'intérieur des dolines	Fort	Fort	Fort	Fort	Fort	Fort
	Périmètre autour des failles (50 m)	Fort	Fort	Fort	Fort	Fort	Fort
	Périmètre autour des indices ponctuels (50 m)	Fort	Moyen	Fort	Moyen	Moyen	Moyen
	Hors périmètres (au-delà de 50 m autour des indices ponctuels et des failles)	Fort	Moyen	Fort	Faible	Moyen	Faible
	Zone d'exutoires	Fort avec recommandations spéciales *					

Tableau. I. 3.détermination du niveau d'aléa .(Noury et al., 2020).

### I.9. Evaluation de l'intensité puis de l'aléa

L'intensité des mouvements de terrain attendus (diamètre) peut s'évaluer suivant la même approche que pour la prédisposition ou via une analyse classique des mouvements connus (définition d'un événement de référence, avec diamètre associé). Le croisement prédisposition / intensité, sous la forme classique d'une matrice, aboutit enfin à l'évaluation de l'aléa (Samyn, Mathieu, Bitri, Nachbaur, & Closset, 2014).

## **I.10. Conclusion**

L'étude approfondie du karst dans ce premier chapitre a permis de cerner les caractéristiques géologiques particulières de ce milieu, marqué par la dissolution des roches carbonatées et la formation de structures souterraines complexes telles que les cavités, les gouffres et les réseaux de drainage. Ce système, à la fois dynamique et fragile, constitue un environnement géotechnique à risque. Ces particularités géomorphologiques génèrent des instabilités naturelles, souvent imprévisibles, qui peuvent compromettre la sécurité et la durabilité des projets d'infrastructure.

L'identification et la compréhension de l'aléa karstique – défini comme la probabilité d'occurrence d'un phénomène karstique dangereux dans un lieu donné – s'avèrent donc essentielles, en particulier dans le cadre des projets d'infrastructure. Cet aléa, fortement influencé par la nature géologique du substratum, les conditions hydrogéologiques, ainsi que les interventions humaines.

La compréhension de la nature du karst et de ses aléas constitue une étape indispensable pour mieux anticiper les risques potentiels. Les chapitres suivants s'attacheront à approfondir les mécanismes à l'origine du karst, les méthodes d'évaluation, ainsi que les différentes solutions adaptées aux zones karstiques.

## **Chapitre II**

**l'origine des problèmes (solubilité fissuration et dynamique du processus) et mécanisme physico-chimique a l'origine du karst**

## **II.1. Introduction**

Le karst est un phénomène géologique majeur qui façonne les paysages et influence profondément l'hydrologie des régions calcaires. Il résulte d'un processus complexe de dissolution des roches carbonatées sous l'effet des eaux de percolation chargées en dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). Ce processus, appelé karstification, transforme progressivement le substrat rocheux en un réseau souterrain de cavités, de conduits et de galeries, modifiant ainsi les modes de drainage et d'érosion.

L'origine de la karstification repose sur plusieurs facteurs essentiels, notamment la solubilité des roches carbonatées, la présence de fractures et fissures dans le substrat, et la dynamique des écoulements d'eau souterraine. La dissolution du calcaire ne se fait pas de manière uniforme, mais dépend fortement des conditions climatiques, de la teneur en CO<sub>2</sub> de l'eau, et de la vitesse de circulation des fluides. En conséquence, certaines zones évoluent plus rapidement, créant des formes de relief caractéristiques telles que les dolines, les gouffres, les lapiaz ou encore les réseaux de grottes.

D'un point de vue scientifique, le karst est le résultat d'un mécanisme physico-chimique complexe impliquant des réactions d'équilibre entre l'eau, le dioxyde de carbone et le carbonate de calcium. L'acidité naturelle de l'eau de pluie, enrichie en CO<sub>2</sub> par la respiration des racines et la décomposition de la matière organique dans le sol, est à l'origine du pouvoir dissolvant de l'eau. Cette dissolution chimique est renforcée par des conditions hydrodynamiques spécifiques, qui déterminent l'élargissement progressif des fissures et la formation d'aquifères karstiques.

Comprendre ces processus est essentiel pour plusieurs raisons. D'un point de vue environnemental, les systèmes karstiques jouent un rôle clé dans la gestion des ressources en eau souterraine, mais sont également vulnérables aux pollutions du fait de la rapidité des infiltrations. Sur le plan géotechnique, la karstification peut engendrer des risques majeurs d'effondrements de terrain et de déstabilisation des infrastructures. Enfin, les paysages karstiques, souvent spectaculaires, présentent un intérêt scientifique et touristique considérable, nécessitant une gestion et une préservation adaptées.

Dans ce chapitre, nous explorerons en détail les origines des problèmes liés au karst, en nous focalisant sur la solubilité des roches carbonatées, la fissuration naturelle et la dynamique des processus de dissolution. Nous analyserons ensuite les mécanismes physico-chimiques responsables de la formation du karst, en mettant en évidence les réactions chimiques fondamentales et les facteurs influençant l'évolution des paysages karstique.

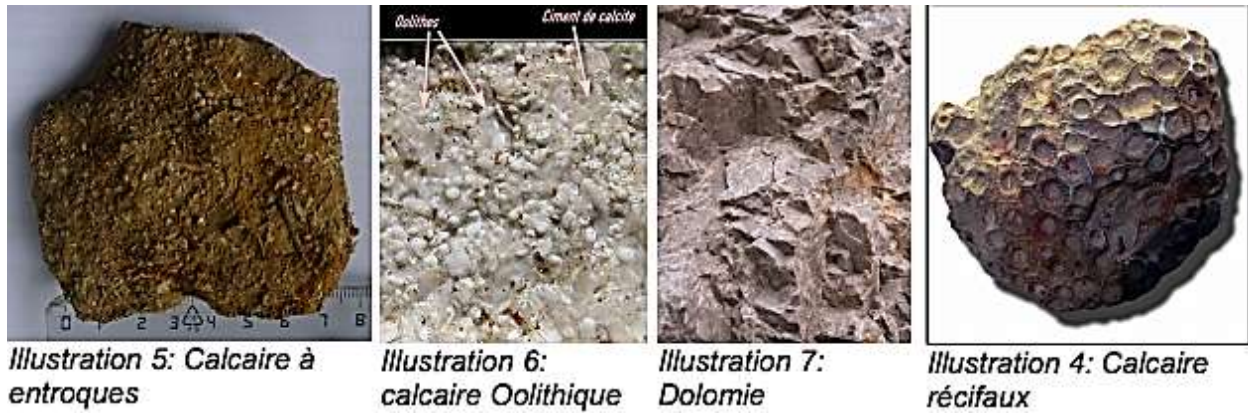
## **II.2. L'histoire des terrains accueillant les réseaux karstiques**

La karstification est un phénomène qui peut affecter toutes les roches solubles, mais c'est le calcaire qui est le plus répandu sur la planète. Ce dernier se forme au fond des océans lorsque des carbonates précipitent à partir des éléments dissous dans l'eau. Cette précipitation peut se produire de deux façons : soit grâce aux organismes marins qui utilisent ces carbonates pour construire leurs coquilles et récifs, soit par des changements dans l'eau qui entraînent la formation de dépôts autour d'un noyau, qu'il soit organique ou minéral (Gilli, 2011).

Le calcaire est principalement composé de carbonate de calcium, une substance qui se dissout facilement au contact d'une eau légèrement acide. Ce processus est à l'origine de la formation des grottes et des concrétions souterraines, mais aussi du dépôt de tartre dans les canalisations domestiques (Gilli, 2011).

La dolomie est une roche similaire au calcaire, mais elle contient aussi du magnésium. On en trouve notamment en Wallonie.

La craie, quant à elle, est une forme plus poreuse et plus fragile du calcaire. Elle est moins propice à la formation de grottes accessibles, mais elle peut néanmoins être affectée par la dissolution.(Gilli, 2011).



**Figure. II.1.** Représente des illustrations de types de la roche (NOURY et al,2021).

La température et la pression qui vont jouer un rôle important dans la concentration des carbonates disponibles dans l'eau. Les variations du niveau marin (transgression, régression marine) vont avoir un impact sur les alternances sédimentaires. Dans un même lieu, il n'est pas rare de passer d'une sédimentation calcaire à une sédimentation marneuse, ce qui crée des massifs caractéristiques constitués de bancs calcaires intercalés entre des bancs plus ou moins importants de marnes. Ces alternances sédimentaires vont créer des zones de faiblesse dans le massif qui joueront un rôle important dans le développement du karst (NOURY et al,2021).



*Illustration 8 : alternance de marne et de calcaire avec des proportions différentes, à droite les bancs de marne sont plus important que les bancs de calcaire*

**Figure. II.2.** Illustration d'alternance de marne et de calcaire (NOURY et al,2021).

Avec le mouvement perpétuel des plaques tectoniques et du niveau marin, certaines de ces couches calcaires se retrouvent émergées et sont alors soumises aux phénomènes d'érosion tels que la dissolution, l'altération, le transport ou le dépôt (NOURY et al, 2021).

### II.3. Le phénomène de karstification

La karstification est un processus qui se déroule en deux étapes principales. D'abord, la dissolution des roches carbonatées forme des conduits et des cavités. Ensuite, l'effondrement mécanique et l'érosion agrandissent ces espaces sous l'effet de l'eau en mouvement. Ce phénomène combine donc une dissolution chimique (corrosion) et une destruction physique (érosion). (Milanovic, 2004)

Élargissent les vides initiaux de la roche encaissante et établit progressivement une structure de drainage organisée le long de chemins préférentiels d'écoulement (discontinuités géologiques). Ces processus de dissolution interviennent aussi bien en surface, notamment via l'infiltration d'eau météorique, qu'en profondeur sous l'effet de remontée de fluides profonds. Il en résulte des morphologies caractéristiques à la fois en surface et en profondeur (Ford and Williams, 2007)



Figure.II.3. Schéma d'une karstification (d'AquaPortail, 19 juin 2009).

## **II.4. L'origine des problèmes**

L'origine des problèmes du karst réside dans les processus géologiques, hydrologiques et mécaniques qui façonnent ce type de paysage. Ces problèmes sont liés à la solubilité des roches carbonatées, à la fissuration du massif rocheux sous l'effet des contraintes tectoniques et mécaniques, ainsi qu'à la dynamique du processus karstique, qui inclut l'évolution des réseaux souterrains et les effondrements.

Ces phénomènes engendrent des instabilités géotechniques, des risques d'effondrement (dolines, avens), une circulation imprévisible de l'eau souterraine, ainsi que des difficultés pour l'aménagement du territoire et la gestion des ressources en eau (Camille and GRIMBÉRIEUX, 2010).

### **II 4.1 Fissuration et solubilité**

Cela concerne principalement les calcaires, les dolomies et les craies. Ces roches sont vulnérables à l'action des eaux légèrement acides, qui les dissolvent progressivement, même lorsque l'eau circule lentement.

La formation de cavités souterraines est grandement influencée par la présence de fissures dans la roche. En effet, l'eau s'infiltré et se concentre plus facilement dans ces fractures, ce qui accélère la dissolution du matériau. À l'inverse, dans une roche peu fissurée, l'eau est dispersée dans les pores, ce qui ralentit le processus de karstification (Ek et al., 2006).

#### **II.4.1.1. La Fissuration et l'Évolution Structurale du Karst**

La dissolution seule ne suffit pas à créer un réseau karstique développé. L'existence de fissures et de fractures est cruciale pour l'initiation et l'évolution du système.



**Figure.II.4.** Réseaux de fissures et marques de racines dans lepkarst (Bakalowicz, 1995).

#### II.4.1.2. Origine des Fissures et Fractures

##### a. Facteurs tectoniques

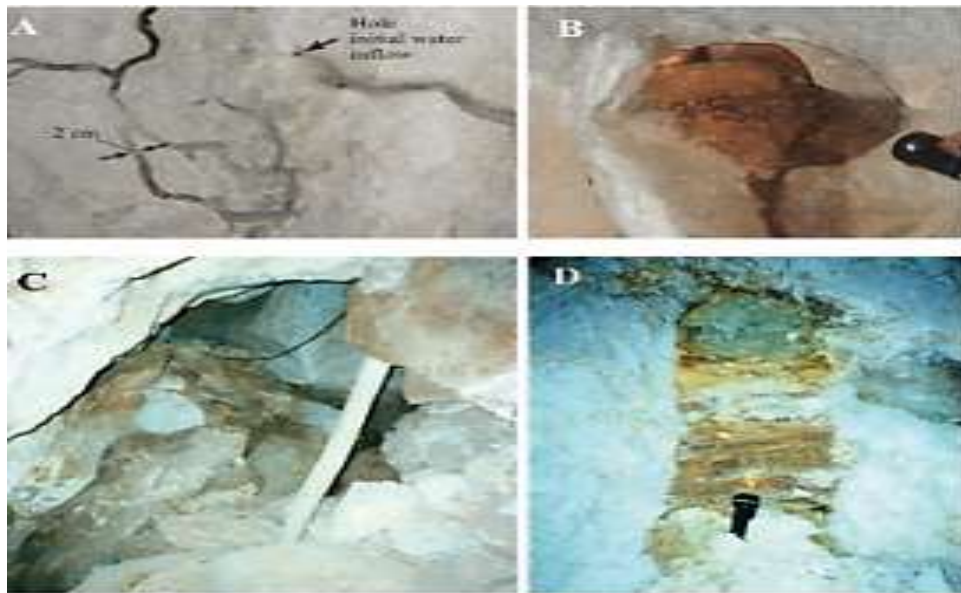
Dans de nombreux cas, l'activité tectonique, combinée à la corrosion et à l'énergie cinétique de l'écoulement turbulent des eaux souterraines, crée d'immenses cavernes (Fig.5.C). Le stade final de la karstification se produit lorsque l'énergie des eaux souterraines diminue jusqu'à un minimum, généralement en raison de l'abaissement du niveau de la nappe phréatique. En conséquence, l'obstruction des conduits dans toute zone temporairement ou saisonnièrement saturée est un processus fréquent (Fig.5.D) (Milanovic, 2004).

Les mouvements de compression ou d'extension créent des fractures initiales dans la roche, facilitant l'infiltration des eaux acides.

##### b. Phénomènes mécaniques

La dissolution linéaire le long d'une discontinuité, comme un plan de stratification ou une fracture de joint. Lorsqu'un conduit karstique s'élargit suffisamment (environ un centimètre dans de nombreux cas), l'écoulement laminaire est remplacé par un écoulement turbulent lorsque le gradient hydraulique est suffisant. Les processus d'érosion mécanique peuvent alors se coupler à la dissolution, entraînant une augmentation rapide de la taille du conduit karstique (Fig.5.B).

L'alternance gel/dégel, la pression lithostatique et les érosions différentielles peuvent agrandir les fissures existantes (Milanovic, 2004).



**Figure.II.5.** Genèse des formations karstiques. (Milanovic, 2004).

- (A) Conduits karstiques initiaux formés par la corrosion le long d'un plan de discontinuité.**
- (B) Conduit karstique élargi par l'effet combiné de la corrosion et de l'érosion mécanique.**
- (C) Grande caverne (interceptée par un rideau d'injection) créée par des processus tectoniques, de corrosion et d'érosion.**
- (D) Exemple d'un conduit karstique obstrué lors des dernières étapes de la karstification.**

#### **II.4.1.3. Rôle de la Fissuration dans le Processus Karstique**

Les fissures offrent des points d'entrée pour l'eau, favorisant l'élargissement des conduits souterrains.

Les fractures peuvent devenir des drains principaux, structurant ainsi le réseau karstique.

La dissolution peut affaiblir les parois et provoquer des effondrements, contribuant à l'évolution du paysage (Milanovic, 2004).

Les principales discontinuités géologiques qui favorisent la circulation de l'eau sont les fissures naturelles, comme les diaclases, les joints de stratification et les failles. Ces structures facilitent la

progression de l'eau en profondeur et accélèrent ainsi le développement du relief karstique, avec la formation de réseaux souterrains et de grottes. Milanovic, 2004).

## **II .4.2. La Solubilité des Roches Carbonatées**

Les minéraux carbonatés sont composés de l'anion carbonate ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) et de divers cations bivalents (Füchtbauer et al., 1988). Le calcaire est constitué de calcite, le minéral karstique le plus important. Il s'agit de la modification basse pression du  $\text{CaCO}_3$ , formée principalement par précipitation biochimique à partir de l'eau de mer ou d'eau douce. Avec l'augmentation de la température de l'eau et du rapport Mg/Ca, une quantité croissante de  $\text{Mg}^{2+}$  s'intègre dans le réseau cristallin, bien que son rayon (78 pm) soit plus petit que celui du  $\text{Ca}^{2+}$  (106 pm). La solubilité de la calcite augmente avec la teneur en Mg (Davis, 2000). D'autres impuretés chimiques dans le réseau cristallin influencent également la solubilité minérale et donc la karstifiabilité du calcaire.

Les roches carbonatées contiennent aussi des minéraux non solubles, principalement des argiles (notamment l'illite) et différentes formes de quartz (Llopis Lladó, 1970). La karstifiabilité des roches carbonatées diminue généralement avec l'augmentation de ces impuretés minéralogiques. La dissolution du calcaire conduit souvent à la formation d'argiles résiduelles, qui peuvent apparaître sous forme de sols ou de remplissages de cavités. Les calcarenites contiennent des grains de quartz détritiques, tandis que le quartz micro- et cryptocristallin (chert et silex) précipite chimiquement lors de la diagenèse et se présente sous forme de nodules ou de strates.

### **II.4.2.1. Facteurs Influant la Solubilité**

**Concentration en  $\text{CO}_2$**  : Une forte teneur en  $\text{CO}_2$  atmosphérique ou pédologique augmente l'acidité de l'eau et accélère la dissolution.

**Température et pression** : Une basse température et une forte pression favorisent la dissolution du  $\text{CO}_2$  dans l'eau, intensifiant l'attaque chimique des roches.

**Débit d'eau** : Un écoulement plus rapide renouvelle l'eau et favorise la dissolution continue du calcaire (Llopis Lladó, 1970).

## **II.5. Les processus karstiques**

Les processus de la karstification se déroulent essentiellement dans la masse de la roche, au sein de celle-ci, et ne sont donc en général pas directement perceptibles en surface, sauf lorsqu'ils se propagent depuis la profondeur jusqu'à l'affleurement ou lorsque l'eau, trouvant des fissures, s'y perd et abandonne à la surface une vallée qui devient curieusement sèche. Dans bien des cas, la prospection spéléologique est la seule méthode d'observation directe des processus de karstification. Elle seule permet, notamment, de distinguer la part de travail qui revient à la dissolution de la roche (processus physico-chimique) et ce qui est dû à l'érosion (processus mécanique), ce qui importe évidemment pour le traitement des problèmes (Camille and GRIMBÉRIEUX, 2010).

### **II.5.1. Le stade initial de la karstification**

Lorsque l'eau commence à s'infiltrer dans la roche - dans ses fissures ou dans les pores de sa masse - la dissolution seule agit. Le débit de l'eau dans ces conditions est si faible que le liquide ne peut avoir d'action mécanique et, surtout, la vitesse d'écoulement de l'eau dans les pores et dans les fissures est trop basse pour que l'eau puisse rien éroder. La dissolution est donc le phénomène initial (Camille and GRIMBÉRIEUX, 2010).

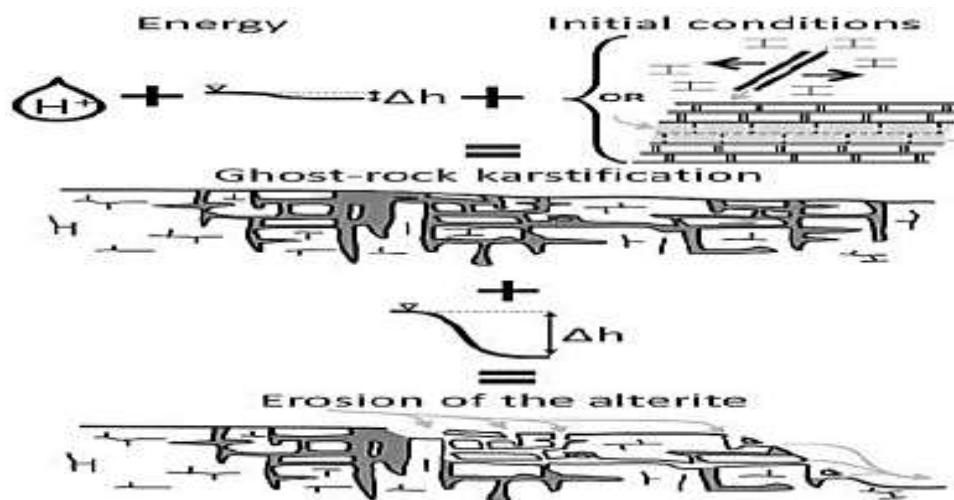
### **II.5.2. Les stades ultérieurs**

Lorsque les fissures s'élargissent, l'eau peut y couler plus vite et l'érosion mécanique s'installe, finissant, dans beaucoup de cours d'eau souterrains, par être plus importante que la dissolution. Le sable et les cailloux transportés usent le lit des rivières souterraines. Lorsque des conduits s'élargissent et que naissent des salles, des écroulements de plafond s'ajoutent - ou succèdent - à l'action de l'eau. Lorsque, par effondrements successifs, la cavité atteint la surface du sol, une catastrophe peut survenir (Ozer et al., 2014).

### **II.5.3. Une autre origine de la karstification : "les fantômes"**

Le terme de karstification par « fantômisiation » est utilisé pour décrire un processus de spéléogénèse en deux phases : une phase de dissolution partielle dans des conditions de faible gradient hydraulique, qui va produire le « fantôme de roche », et une seconde phase d'érosion mécanique par érosion régressive consécutive à l'augmentation du gradient hydrodynamique (Figure 2). Les roches fantômées présentent une stratification préservée, des fractures visibles et des fossiles préservés. Cependant, la roche est devenue

localement non cohérente et très poreuse. La première phase d'altération, la « fantômisation » (ghost-rock karstification), résulte en une altération iso-volumique de l'encaissant sous des conditions de très faible gradient hydraulique (Dubois et al., 2014 ; Vergari and Quinif, 1997). Cette phase d'altération peut être liée soit à l'infiltration épigène, soit à l'écoulement hypogène, en particulier dans les zones marginales des bassins sédimentaires. Dans le cas d'une spéléogénèse par fantômisation épigène (per descensum), la présence d'une couverture contenant des minéraux siliceux, sulfureux ou sulfatés est nécessaire à la libération d'ions  $H^+$  ou de  $H_2SO_4$  pour que l'eau acquiert un caractère agressif. Les produits de l'altération (décalcification ou dédolomitisation) sont évacués en solution, par circulation lente des eaux ou diffusion ionique, tandis que les résidus persistent, produisant des altérites in situ conservant la structure et la texture initiale de la roche. Les corps altérés peuvent présenter des porosités et perméabilités très élevées, jusqu'à 45% et 10D (Dubois et al., 2014) et constituer des volumes poreux fortement capacitifs. L'organisation de ces réseaux « fantômisés » suit généralement la majorité des discontinuités les plus favorables à la karstification, provoquant souvent un maillage calqué sur la fracturation et la stratification. L'établissement de tels systèmes nécessite de longues périodes de temps (peut-être de l'ordre de plusieurs millions d'années) et des conditions géodynamiques stables (Dubois et al., 2014). Avec la création d'un gradient hydraulique, surrection du massif ou enfouissement des vallées, l'altérite est évacuée par érosion régressive au sein du système.



**Figure.II.6.** Schéma conceptuel du processus de karstification par fantômisation (Dubois, 2014).

#### **II.5.4. Corrosion**

La corrosion est un processus d'altération avec évacuation directe du matériel dissous ainsi que des résidus. Ce processus permet d'aboutir aux formes sur roches nues au contact de l'eau agressive. La corrosion constitue le processus de karstification le plus commun. Deux types de systèmes karstiques résultant de ce processus de corrosion sont distingués : (1) les systèmes épigènes ou gravifique (Mangin, 1975), formés sous l'action de l'eau météorique et d'un gradient d'écoulement entre la zone de recharge et zone de décharge, et (2) les systèmes hypogènes, formés par des remontées d'eaux hydrothermales ou de fluides profonds (Audra et al., 2010 ; Ford and Williams, 2007). Les formes en résultant se traduisent en souterrain par les cavités et réseaux karstiques, et en surface par les lapiés, dolines, canyons, etc.



**Figure .II .7.**Odessa photo (Husson et al., 2018)

## **II.6. La dynamique de processus**

La dissolution des roches dans un environnement karstique est un processus extrêmement lent, tout comme l'érosion provoquée par les eaux souterraines. Ces phénomènes se déroulent sur des échelles de temps géologiques. Cependant, une fois que des cavités souterraines se sont formées, des effondrements peuvent survenir de manière soudaine et imprévisible. (Ek et al., 2006).

L'une des principales causes de dégâts dans ces milieux réside dans les modifications brusques du réseau karstique. Par exemple, une perte d'eau peut être obstruée par des sédiments, des branchages ou d'autres débris végétaux, ce qui entraîne une accumulation d'eau en amont et peut provoquer des inondations. À l'inverse, lors d'une crue, un remplissage naturel d'une cavité (sable, limon ou autres matériaux) peut être soudainement évacué, entraînant l'affaissement du toit de la cavité (Ek et al., 2006)

Les eaux de surface jouent également un rôle important : en creusant la couverture meuble du sol, elles peuvent mettre à nu des roches fissurées et créer de nouvelles ouvertures par lesquelles l'eau s'infiltre, générant ainsi la formation soudaine d'une perte. Parfois, c'est l'intervention humaine qui rouvre accidentellement un ancien chanoir (perte d'eau) auparavant comblé et oublié. Ce type de phénomène peut donner l'impression d'une transformation rapide du paysage karstique, alors qu'il s'agit simplement d'une réactivation d'un ancien conduit (Ek et al., 2006).

Contrairement à la dissolution et à l'érosion, qui évoluent sur le long terme, ces événements peuvent survenir en un instant et, dans certains cas, provoquer de véritables catastrophes (Ek et al., 2006).

## **II.7. Le potentiel de karstification**

le potentiel de karstification est défini par deux facteurs : le « moteur » de l'écoulement souterrain et le « solvant », qui permet la dissolution de la roche par l'eau souterraine, et donc l'élargissement de certains des vides initiaux (Mangin, 1994).

### **II.7.1. Le moteur**

Communément la gravité. Plus fort est le **gradient hydraulique** potentiel entre la surface de recharge et l'émergence, plus facile sera l'écoulement souterrain, et donc plus efficace sera le transport et l'évacuation des matières dissoutes. À la gravité peut s'ajouter un gradient de densité,

lié au mélange eau douce – eau salée (cas des aquifères côtiers), ou de température dû au mélange entre de l'eau thermale et de l'eau fraîche (Mangin, 1994).

### **II.7.2. Le solvant**

Le plus commun est l'eau de pluie et toutes les eaux de surface qui s'infiltrent, rendues acides par la dissolution de CO<sub>2</sub>, très soluble dans l'eau. L'eau d'infiltration se charge de CO<sub>2</sub> et devient suffisamment acide pour dissoudre les roches carbonatées en profondeur (Bakalowicz, 1979). Elle transporte et disperse le CO<sub>2</sub> dans le sous-sol, maintenant en permanence son pouvoir dissolvant. L'atmosphère terrestre en contient peu (pression partielle pCO<sub>2</sub> : 0,035%) et la pluie dissout environ 30 mg/L de carbonate de calcium CaCO<sub>3</sub>. Mais la vie dans les sols produit beaucoup de CO<sub>2</sub> qui s'y accumule jusqu'à y être 100 fois plus abondant que dans l'air extérieur (pCO<sub>2</sub> : 2 à 4%), permettant la dissolution de 250 à 350 mg/L de CaCO<sub>3</sub>.

Plus l'eau et le CO<sub>2</sub> s'infiltrant sont abondants, plus rapide est le processus de karstification. La quantité d'eau s'infiltrant est déterminée par les précipitations sur la zone de recharge et par les éventuels écoulements de surface se perdant dans la roche carbonatée après avoir coulé sur des terrains imperméables. Cette quantité d'eau dépend donc du climat et de la géométrie du réservoir. La pression partielle de CO<sub>2</sub>, fixée par le couvert végétal et la température de l'air, dépend aussi du climat. D'autres solvants ont été identifiés dans l'interaction de l'eau souterraine avec des gaz d'origine profonde, comme H<sub>2</sub>S et le CO<sub>2</sub> hydrothermal, ou dans le mélange eau douce – eau salée. Ces solvants sont à l'origine de formes et d'organisations particulières des vides et du drainage d'aquifères karstiques, comme les karsts hydrothermaux et les karsts littoraux (BAKALOWICZ, 1996).

Différentes approches indépendantes montrent qu'un réseau classique de conduits karstiques se met en place en quelques dizaines de milliers d'années, c'est-à-dire plus rapidement qu'un réseau fluvial (Bakalowicz, 1992). De ce fait, le karst est très sensible aux événements géologiques susceptibles de modifier le niveau de base et la perméabilité originelle de la roche. Tous les spécialistes du karst sont maintenant d'accord pour affirmer que toutes les formations carbonatées ont été karstifiées à des degrés divers au cours des temps géologiques (Chen et al., 2017).

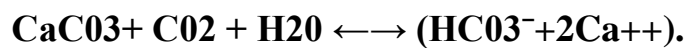
## **II.8. Les mécanismes physico-chimiques à l'origine d'un karst**

À l'origine des réseaux karstiques, il y a deux mécanismes qui peuvent se produire. Un phénomène chimique, la karstification et un phénomène physique, la suffosion.

### **II.8.1. La karstification**

La karstification est le phénomène de dissolution de roches carbonatées (carbonate de calcium, CaCO<sub>3</sub>), de gypses (CaSO<sub>4</sub>, 2H<sub>2</sub>O) ou de sels par des eaux chargées en dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). Cette dissolution peut alors créer des vides souterrains que l'eau empruntera préférentiellement, c'est ce qu'on appelle le réseau karstique (Clerveau, 2016).

Pour les carbonates la réaction de dissolution qui se produit est la suivante :



#### **II.8.1.1. La dissolution des roches carbonatées dépend de plusieurs facteurs**

##### **II.8.1.1.1. La nature de la roche**

Comme mentionné précédemment, les différents types de roches carbonatées possèdent des caractéristiques physiques, chimiques et morphologiques variées qui influencent leur vulnérabilité à la dissolution.(Clerveau, 2016).

##### **II.8.1.1.2. La teneur en CO<sub>2</sub> de l'eau**

Une eau fortement chargée en CO<sub>2</sub> a un pH plus faible, ce qui favorise l'attaque des carbonates de calcium.(Clerveau, 2016)

##### **II.8.1.1.3. La température de l'eau**

Plus l'eau est froide, plus elle peut contenir d'éléments dissous (CO<sub>2</sub>, CaCO<sub>3</sub>, etc.), ce qui joue un rôle clé dans le transport des carbonates hors du système (Clerveau, 2016).

#### **II.8.1.1.4 La pression**

Une pression élevée favorise la dissolution des éléments, augmentant ainsi leur concentration dans l'eau.

#### **I.8.1.1.5. L'abondance en eau**

Une plus grande quantité d'eau augmente la surface de contact avec les roches et facilite le transport des éléments dissous.

#### **II.8.1.1.6. Le temps de contact de l'eau avec la roche**

Un contact prolongé entre l'eau et la roche permet une dissolution plus efficace.

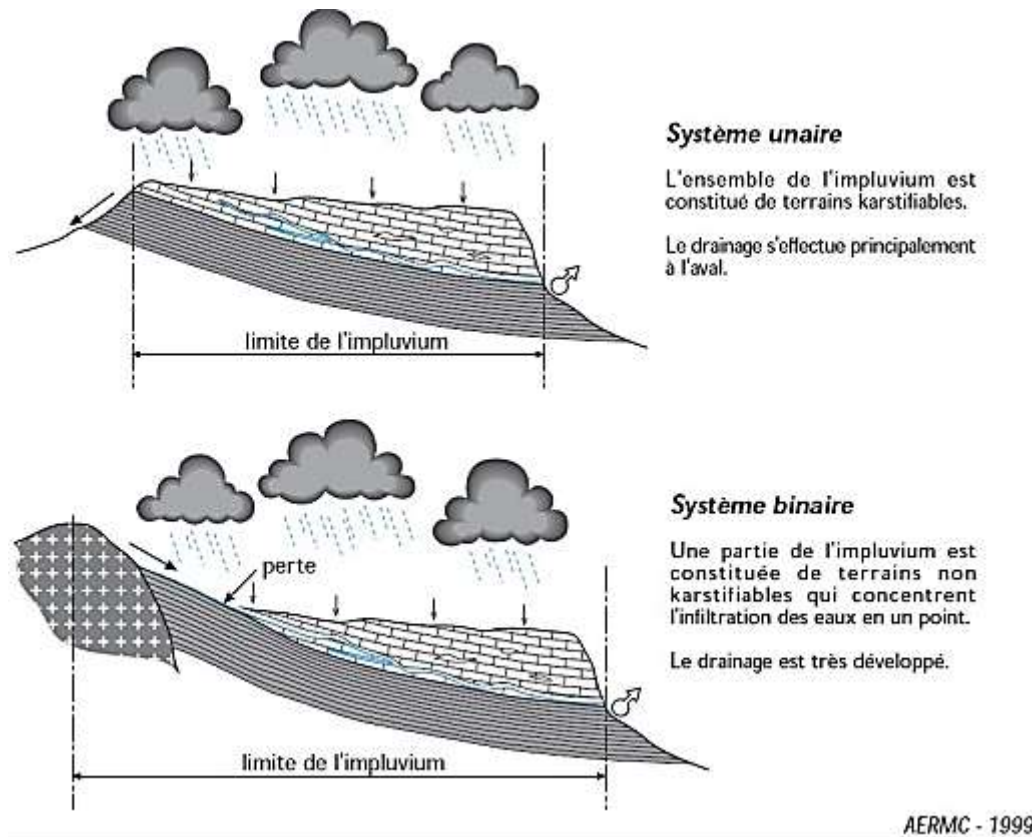
#### **II.8.1.2. L'emplacement de ces réseaux karstiques et leur développement sont fortement influencés par les caractéristiques suivantes.**

##### **II.8.1.2.1. L'impluvium du point d'infiltration des eaux**

Dans un système unaire, le réseau karstique est limité à l'aquifère, tandis que dans un système binaire, il inclut également le bassin versant de surface drainé par les points d'infiltration (dolines, pertes, gouffres, avens) (Clerveau, 2016).

##### **II.8.1.2.2. La taille du bassin versant**

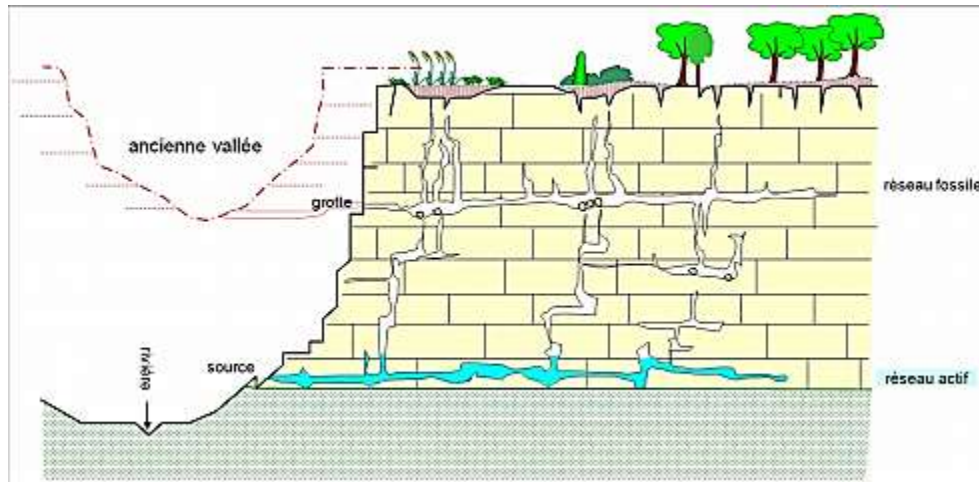
Plus celui-ci est vaste, plus le volume d'eau drainé est important, influençant directement le développement du réseau karstique (Clerveau, 2016).



**Figure.II.8.** Système karstique uniair ou binaire(AERMC, 1982).

### II.8.1.2.3. La localisation des résurgences (sources)

L'eau infiltrée rejoint un niveau de base d'écoulement (ruisseau, rivière, fleuve, etc.), dont l'altitude influence la structuration des réseaux karstiques. Ces réseaux peuvent être actifs, assurant une fonction drainante continue, ou fossiles, lorsqu'ils ne sont plus parcourus quotidiennement par l'eau. Cependant, des modifications locales ou régionales (pompage, infiltration, drainage minier, pluviométrie intense) peuvent réactiver ces réseaux fossiles, entraînant parfois des coulées boueuses (Clerveau, 2016).



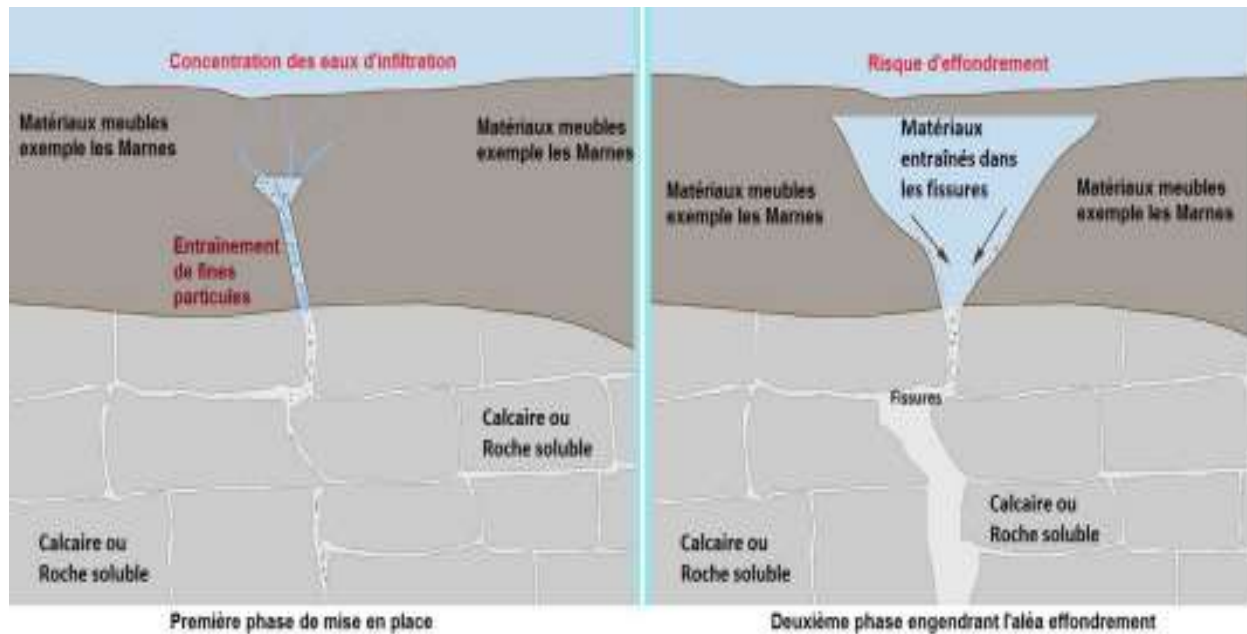
**Figure.II.9.** Différenciation entre réseau actif et réseau fossile (Clerveau, 2016)

#### II.8.1.2.4. Stratification et tectonique des terrains

La formation des cavités est généralement précédée par une phase tectonique, car l'ouverture des discontinuités est une condition essentielle à l'infiltration de l'eau. Les failles et les alternances stratigraphiques constituent des zones de faiblesse dans la roche, en raison des variations de leurs caractéristiques physiques et chimiques. Ces zones favorisent donc les écoulements d'eau et le développement des réseaux karstiques. Il est donc crucial d'analyser le pendage des couches et l'orientation des fractures pour mieux comprendre le cheminement des eaux souterraines (Clerveau, 2016).

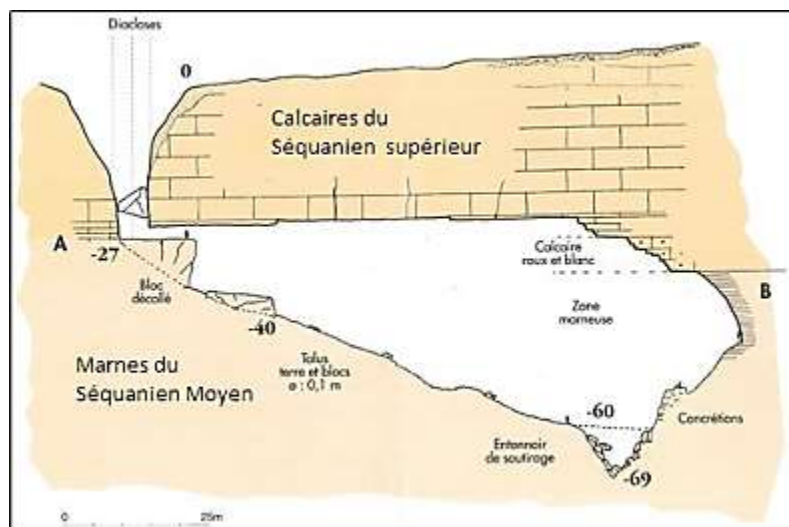
#### II.8.2. La suffosion

Contrairement à la karstification, qui est un processus chimique, la suffosion est un phénomène mécanique. Elle correspond à une érosion interne causée par la circulation des eaux souterraines. Dans les formations sédimentaires meubles, ces écoulements peuvent entraîner les particules les plus fines (marnes, schistes, sables fins, silts, etc.), provoquant ainsi la formation de vides. Les matériaux transportés sont ensuite évacués soit à travers les fissures d'une roche voisine, soit vers une cavité proche (vide karstique, cave, ouvrage d'assainissement, etc.) (Clerveau, 2016).



**Figure.II.10.** Schéma du principe d'entraînement de particules fines par suffosion

Des études en karstologie ont révélé que certains vides souterrains de grande envergure, comme le gouffre de Poudrey dans le Doubs (Illustration n°12), se sont formés par affouillement et soutirage. Leur genèse ne résulte pas uniquement de la dissolution et des effondrements classiques des grottes, mais également de l'érosion et du transport de matériaux tendres situés sous une masse calcaire stable (Clerveau, 2016).



**Figure.II.11.** Coupe du Gouffre de Poudrey (Doubs)(Gilli, 1986)

## **II.9. Conclusion**

Le karst est un paysage particulier qui se forme quand certaines roches, comme le calcaire, se fissurent et se dissolvent au contact de l'eau. Tout commence par des fissures dans la roche, causées par les mouvements de la Terre, le gel, la chaleur ou la pression. Ces fissures permettent à l'eau de pluie, souvent acide à cause du gaz carbonique qu'elle contient, de s'infiltrer dans la roche. Cette eau acide dissout lentement le calcaire, ce qu'on appelle la solubilité.

Les petites fissures deviennent de plus en plus grandes et forment des grottes, des trous, des rivières souterraines ou des effondrements. Ce mélange de phénomènes physiques (fissuration) et chimiques (dissolution) agit lentement mais modifie profondément le sol et le paysage. On appelle cela la dynamique du karst, C'est pourquoi les zones karstiques sont souvent belles, mais aussi fragiles et sensibles aux changements.

## **Chapitre III**

**Contexte hydrogéologique ou  
hydrologique et impact sur les  
circulations d'eau**

### **III.1. Introduction**

L'eau, en tant que ressource naturelle essentielle, circule à la fois en surface et dans le sous-sol selon des mécanismes complexes et étroitement liés au contexte physique d'un territoire. La compréhension des dynamiques hydriques passe nécessairement par l'étude conjointe des contextes hydrologique et hydrogéologique, qui conditionnent la disponibilité, la qualité et la vulnérabilité de la ressource en eau.

Le contexte hydrologique se réfère aux caractéristiques climatiques, topographiques et hydrométriques influençant les écoulements de surface, tels que les rivières, les lacs et les eaux de ruissellement. À l'inverse, le contexte hydrogéologique concerne les propriétés géologiques du sous-sol qui déterminent les conditions de circulation et de stockage des eaux souterraines, à travers les aquifères et les nappes phréatiques

Ces deux contextes interagissent fortement et ont un impact direct sur les circulations d'eau. Ils influencent la vitesse d'infiltration, la recharge des nappes, les zones de résurgence, ou encore la vulnérabilité aux inondations et à la pollution. Par exemple, un sol imperméable entraînera un ruissellement intense, tandis qu'un sous-sol karstique favorisera des circulations rapides et peu filtrées en profondeur.

### **III.2. Définition de contexte hydrogéologique**

Le contexte hydrogéologique correspond à l'ensemble des conditions physiques qui influencent le comportement d'un aquifère en matière d'écoulement. Il est principalement déterminé par la stratigraphie, la lithologie et la structure géologique, lesquelles définissent le type d'aquifère, les zones de recharge et de décharge, ainsi que les caractéristiques de porosité et de perméabilité. Si l'on peut modéliser l'écoulement souterrain à l'aide d'équations de débit, alors le contexte hydrogéologique représente les conditions aux limites de ces modèles. (White, Dey, & Schulman, 1989).

### **III.3. Propriété hydrogéologique**

Les formations rocheuses karstifiées constituent des milieux d'une extrême complexité, susceptibles de générer une large gamme de conditions géomorphologiques, hydrogéologiques,

hydrologiques, hydrauliques ainsi que des problématiques spécifiques à la géologie de l'ingénieur (Milanović, 2018).

Dans les environnements karstiques, le concept de Volume Hydrogéologique Élémentaire Représentatif (EHV) applicable aux aquifères n'est pas pertinent. Les principaux paramètres hydrogéologiques, tels que le coefficient hydraulique ou la transmissivité, ne peuvent être déterminés avec précision, que ce soit par des mesures de terrain ou en laboratoire. En pratique, l'EHV – souvent désigné comme « effet d'échelle » – tend à englober l'aquifère karstique dans sa globalité. La caractéristique hydrogéologique dominante de ces milieux reste leur forte hétérogénéité (Milanović, 2018).

La porosité effective des roches karstiques à l'échelle régionale demeure faible, généralement comprise entre 0,5 % et, plus rarement, au-delà de 3 %. Il est courant de rencontrer des forages affichant des perméabilités limitées (1 à 3 Lu), même à proximité de conduits karstiques majeurs (Milanović, 2018).

Dans ces milieux, l'écoulement souterrain est de nature turbulente et s'effectue majoritairement à travers de vastes conduits. Les vitesses moyennes de circulation peuvent varier de 0,002 à 60 cm/s. Toutefois, dans certaines situations – notamment sous des pressions atteignant 12 bars – des vitesses supérieures à 16 m/s ont été observées au sein des conduits karstiques (Milanović, 2018).

#### III.4. Les spécificités hydrogéologiques du système karstique

Selon la définition hydrogéologique, le karst possède une zonation morphologique et hydrodynamique qui s'organise principalement de manière verticale et permet de différencier quatre parties dans l'aquifère karstique (Camus, 2003 ; Joves et al., 2017 ; Mangin, 1975) :

- l'**épikarst** représente la partie superficielle du karst. Epais de quelques mètres à quelques dizaines de mètres, l'épikarst collecte les eaux d'infiltration, les stocke temporairement avant qu'elles ne soient drainées en profondeur. L'épikarst représente la zone d'échange entre l'atmosphère et le système karstique (Williams, 2008) et est caractérisé par une forte porosité efficace (Klimchouk, 2004).
- la **zone d'infiltration**, zone vadose ou encore zone non-saturée selon les auteurs, correspond à la partie de l'aquifère karstique dans laquelle les eaux s'écoulent depuis l'épikarst jusqu'à

la zone épinoyée. Les écoulements peuvent être lents et s'effectuer dans des vides de petites tailles avec de forte pertes de charge, ou rapides et s'effectuant dans les conduits verticaux ou les fractures verticales.

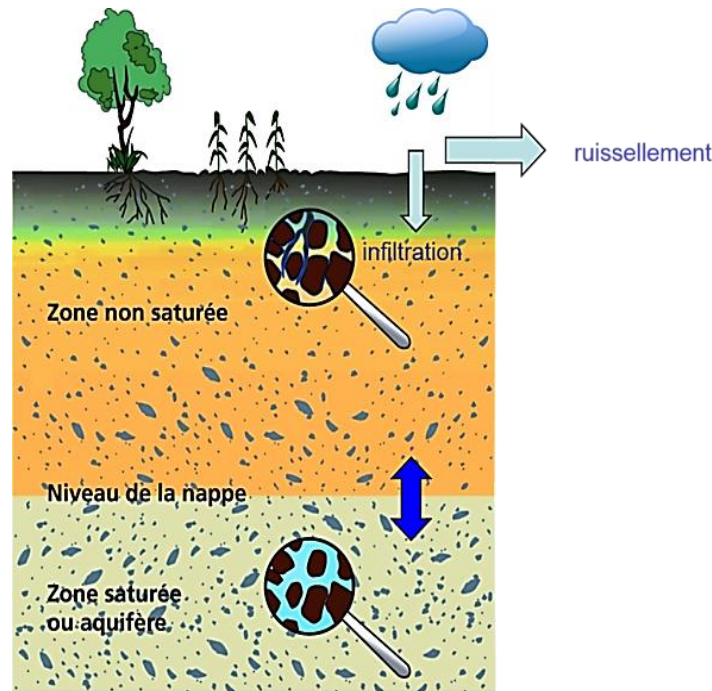


Figure III.1. Schéma distinctif zone non-saturée / zone saturée (BRGM, 2018)

La **zone épinoyée**, zone de fluctuation du niveau piézométrique ou encore zone épiphréatique, correspond à la partie de l'aquifère contenue entre la surface piézométrique en basses eaux (étiage) et en hautes eaux (crues).

- La **zone noyée** ou zone phréatique ou zone saturée, correspond à la zone noyée en Permanence.
- Le toit de la zone noyée est en connexion directe avec l'exutoire ou le niveau de base.

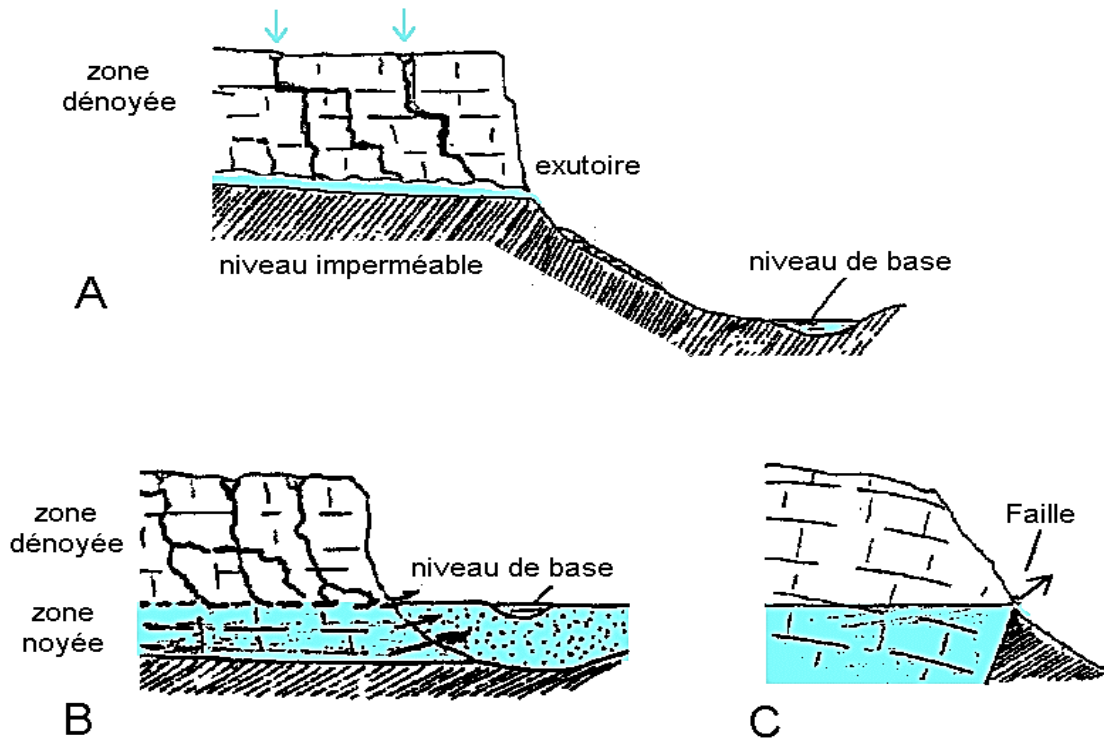


Figure III.2. Systèmes hydrogéologiques karstiques (Mischler et al., 2009).

### III.5. Caractéristiques de contexte hydrogéologiques

#### III.5.1. Aquifères karstique

Les aquifères karstiques sont des aquifères particuliers et singuliers du fait de leur genèse, leur structure et leur fonctionnement. Les dimensions de leurs vides présentent une très grande variabilité, depuis les fissures micrométriques à millimétriques jusqu'à des conduits de quelques dizaines de mètres de section et longs de plusieurs kilomètres. Il en résulte des vitesses d'écoulement à l'intérieur de l'aquifère très variables, allant de moins de quelques centimètres par heure à plusieurs centaines de mètres par heure. Ces circulations souterraines très rapides sont l'une des principales caractéristiques hydrogéologiques des aquifères karstique

Les aquifères karstiques représentent une catégorie particulière d'aquifères fracturés. À la différence des systèmes classiques, l'eau y circule à travers un réseau de discontinuités en dissolvant progressivement la roche, ce qui accentue fortement l'anisotropie de l'aquifère. Ce

processus de dissolution favorise la progression des écoulements, construisant peu à peu un réseau hiérarchisé, allant du bassin versant jusqu'aux exutoires. Ainsi, le fonctionnement d'un système karstique s'apparente à celui d'un réseau hydrographique de surface, où les petits cours d'eau situés en amont convergent pour former des conduits plus larges et moins nombreux en aval.

L'évolution des milieux karstiques est rapide et fortement influencée par les conditions climatiques, qui déterminent les phases d'érosion ou de colmatage. Cette dynamique modifie la géométrie interne du système au fil du temps, ce qui contribue à la complexité de son fonctionnement (Mangin, 2008). L'étude et la modélisation des aquifères karstiques s'avèrent donc particulièrement délicates : contrairement aux milieux poreux, ils ne peuvent être appréhendés à l'aide d'un volume élémentaire représentatif (RVE). Leur compréhension passe nécessairement par une analyse approfondie des processus de karstification propres à chaque région.

Un hydrosystème karstique se caractérise par quatre formes principales de perméabilité :

Une matrice rocheuse globalement peu poreuse, à l'exception de certaines formations carbonatées comme la craie ou la dolomie ;

Des zones à microfissures, présentant une porosité notable mais une faible perméabilité ;

Des conduits actifs, peu stockant mais permettant des vitesses d'écoulement rapides (de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de mètres par heure), plus ou moins bien connectés au reste du système ;

Des paléo-drains et anciennes cavités de karstification, souvent partiellement colmatés, et plus ou moins reliés aux structures actives actuelles.

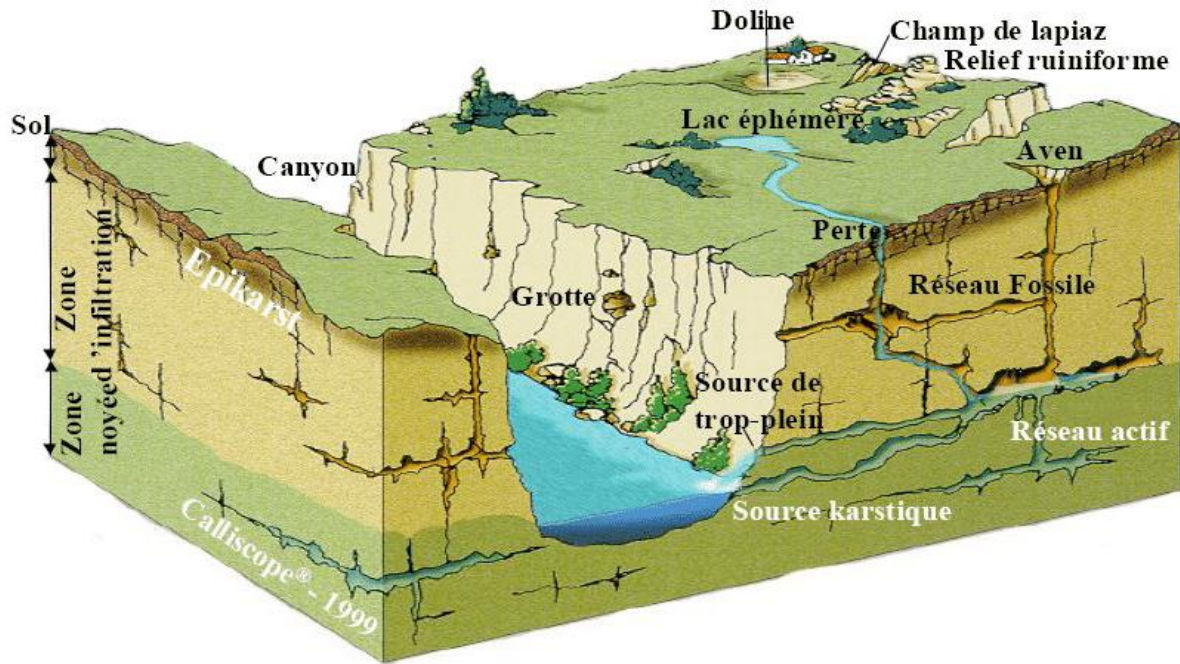


Figure.III.3. Représentation schématique d'un aquifère karstique(Dörfliger & Perrin, 2011).

### III.5.1.1. Les nappes karstiques

En pays calcaire, l'eau remplit et circule dans les cavités du karst dont certaines sont complètement ennoyées. Les vitesses de circulation sont grandes et les sources peuvent être temporaires et abondante(résurgences). (BRGM, 2018).

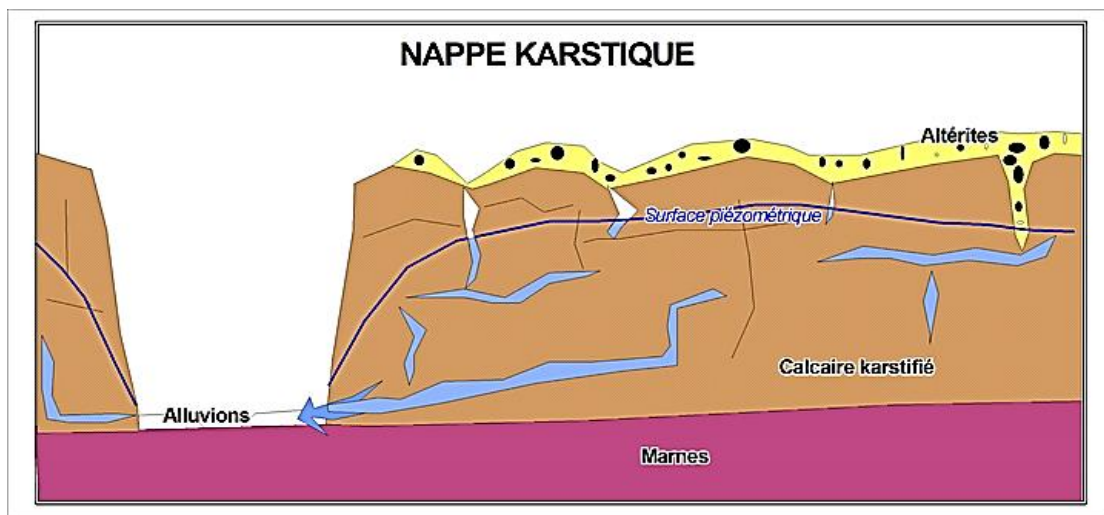
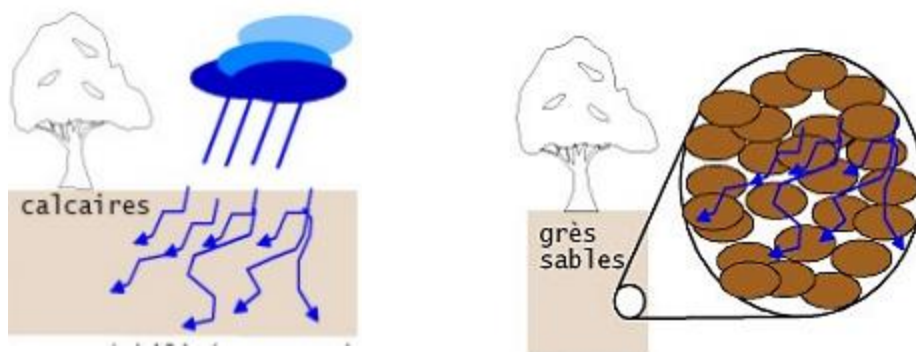


Figure.III.4. Schéma d'une nappe karstique (BRGM, 2018).

### III.5.2. La perméabilité

Dans les zones karstiques, la perméabilité est principalement liée à la présence de fissures, de fractures et de conduits souterrains formés par la dissolution des roches carbonatées, en particulier le calcaire. Contrairement aux milieux poreux où l'eau circule lentement à travers les interstices des grains, le milieu karstique se caractérise par une perméabilité très hétérogène et anisotrope, dominée par des écoulements préférentiels rapides. Cette perméabilité conduit à des vitesses de circulation de l'eau élevées, ce qui rend la gestion des ressources en eau souterraine plus complexe. De plus, la faible capacité de filtration du système karstique le rend particulièrement vulnérable aux pollutions, qui peuvent se propager rapidement depuis la surface jusqu'aux exutoires sans atténuation significative.

Les calcaires sont des matériaux imperméables en petit ou en texture. L'absence de pores ne permet pas les circulations et le stockage de l'eau. Cependant, ils sont perméables en grand ou en structure, car l'eau est présente dans les discontinuités telles les diaclases et les failles



L'eau circule dans les discontinuités

L'eau circule dans les pores de la roche

**Figure.III.5.** La perméabilité dans de milieu différents (Brgm, 2018).

### **III.6. Conclusion et perspective**

Les zones karstiques présentent un contexte hydrogéologique très particulier, marqué par la présence de roches calcaires solubles qui se dissolvent au fil du temps sous l'action de l'eau. Cela entraîne la formation de réseaux souterrains complexes comme des cavités, des fissures, des galeries ou encore des rivières souterraines. Cette structure influence fortement la circulation de l'eau, qui devient rapide, difficile à prévoir et très vulnérable à la pollution. En surface, l'eau peut s'infiltrer rapidement sans filtration, tandis qu'en profondeur, elle circule souvent à grande vitesse sans être stockée longtemps. Cela rend la gestion de l'eau en milieu karstique très délicate, car les ressources sont sensibles aux variations climatiques et aux activités humaines. Il est donc essentiel de bien comprendre ces systèmes pour mieux protéger et gérer les eaux souterraines dans ces régions.

Les systèmes karstiques peuvent offrir des ressources et des réserves d'eau souterraine considérables, faciles à exploiter à partir d'un site unique, qui peut être une source ou un forage à fort débit. Mais leurs aquifères sont très sensibles aux pollutions, car ils disposent en général de peu de protection naturelle filtrante et d'effets dispersifs réduits. Cependant, du fait des écoulements rapides et du temps de séjour moyen souvent inférieur à l'année, ils se renouvellent bien plus rapidement que les aquifères poreux et fracturés : ils ne gardent pas, ou peu, la mémoire d'événements qui se sont produits lors des cycles hydrologiques précédents, comme une sécheresse, une surexploitation temporaire ou une pollution accidentelle ou saisonnière. Enfin, ils peuvent être rechargés artificiellement par des apports d'eau de rivières.

Les hydrogéologues comme les gestionnaires des ressources en eau disposent maintenant d'une méthodologie efficace pour identifier toutes leurs caractéristiques ainsi que des modèles pour les gérer. Le karst doit être considéré comme un milieu géologique particulièrement intéressant dans la politique de l'eau, offrant souvent des ressources et des réserves d'eau potable, des apports en cas de sécheresse et des possibilités de limiter les inondations sans grands travaux hydrauliques.

## **Chapitre IV**

# **Les prospections géotechniques et géophysiques pour la détection des cavités karstiques**

### **IV.1. Introduction**

La réalisation de projets d'infrastructures en zone karstique nécessite une compréhension approfondie du sol et du sous-sol, car ces milieux sont souvent instables et présentent des risques importants tels que les affaissements, les effondrements ou la présence de cavités invisibles en surface. Pour anticiper ces dangers et adapter les choix techniques de construction, il est indispensable de procéder à des investigations de terrain précises et adaptées.

Les prospections géotechniques consistent à étudier directement le sol à travers des sondages, des prélèvements d'échantillons, des essais mécaniques et d'autres observations sur site. Elles permettent d'évaluer la nature des terrains, leur résistance, leur compacité et leur capacité à supporter des charges. De leur côté, les méthodes géophysiques permettent d'obtenir une image indirecte du sous-sol à l'aide de mesures physiques, comme la résistivité électrique ou la vitesse de propagation des ondes sismiques. Ces techniques sont particulièrement utiles pour détecter des anomalies ou des vides, souvent présents en milieu karstique.

Ce chapitre présente donc les différentes méthodes géotechniques et géophysiques utilisées dans le cadre des études en zone karstique. Il expose leurs principes, leurs applications, ainsi que leur intérêt dans la détection des risques pour la conception et la sécurité des infrastructures.

### **IV.2. Les Prospections géotechniques**

La prospection géotechnique est l'ensemble des techniques utilisées pour étudier la nature du sol et du sous-sol avant de construire un ouvrage (bâtiment, route, pont, etc.).

C'est une étude du sol faite pour savoir s'il est suffisamment solide et stable pour supporter une construction. Elle permet aussi de détecter d'éventuels problèmes (comme de l'eau souterraine, des cavités, ou un sol trop meuble (quinif ;2004).

Les méthodes géotechniques comprennent notamment les forages (destructifs ou non), les essais de pénétromètre et les opérations de découverte (par des engins de la famille des pelles mécaniques) (quinif ;2004).

- Les forages donnent des renseignements précis (sur la présence de cavités, ou d'eau, ou de roche altérée, par exemple) mais l'information fournie est purement ponctuelle car limitée au trou de sondage.
- Les opérations de découverte consistent à enlever les dépôts superficiels qui masquent le calcaire pour pouvoir mettre celui-ci à nu afin de pouvoir l'observer.
- La pénétrométrie permet de connaître la résistance du substratum à la pénétration, c'est déjà là une connaissance plutôt indirecte de la qualité du substratum. Les méthodes géotechniques d'investigation sont toutes des méthodes de type mécanique.

#### **IV.2.1. Les forages de reconnaissance**

A côté des grottes naturelles et des tunnels, mines ou autres cavités, le forage est le moyen le plus courant d'avoir accès au sous-sol. Généralement vertical, mais parfois incliné ou même horizontal, d'un diamètre allant de quelques centimètres à plusieurs mètres, c'est souvent le seul moyen de recueillir des informations sur le sous-sol. Loin d'être un simple trou dans le sol, le forage fait intervenir des techniques spécifiques et des professionnels expérimentés (Poiraud, Bernardie, Defive, Bitri, & Grandjean, 2008).

- **Les forages mécaniques destructifs** permettent d'extraire des matériaux en place, et d'en vérifier de visu la nature. Ils permettent, en outre, de prélever des échantillons remaniés pour des essais ultérieurs en laboratoire de mécanique des sols.



**Figure IV.1.** photo d'un forage destructif (cerema, 6 août 2015).



**Figure IV.2.** des échantillons remaniés d'un forage destructif (gexplore, 14 décembre 2016).

- **Les forages mécaniques carottés** permettent de prélever des échantillons intacts, les carottes, directement dans L'ouvrage. Ces échantillons sont ensuite préparés pour des analyses plus complètes en Laboratoire.



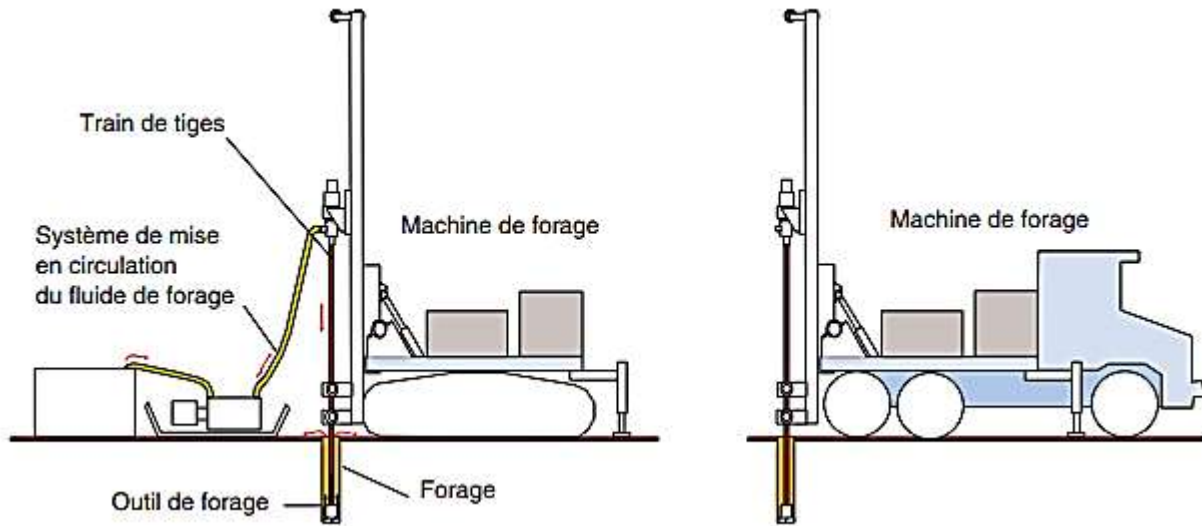
**Figure IV.3.** Photo d'un le forage par carottage(fondasol, mars 2015).



**Figure IV.4.** Photo de carotte de forage(brgm, 2 juillet 2018).

Là encore, l'exécution de ces forages est quasi systématiquement accompagnée d'enregistrement de paramètres qui donnent immédiatement des renseignements sur certaines propriétés mécaniques des sols traversés.

- Mesures de propriétés physiques (résistance à la compression, teneur en eau, perméabilité...)
- Mesures de la composition chimique ou minéralogique globale de la roche
- Confection de lames minces pour analyse sous le microscope polarisant, permettant une analyse détaillée des espèces minérales ou des microfossiles



**Figure IV.5.** Exemple d'architecture de machine de forage(fondasol, mars 2015).

#### **IV.2.1.1. Objectif**

En général, c'est la carte géologique qui renseigne sur la structure et la composition du sous-sol d'une région donnée. Quand la précision de cette carte géologique n'est pas suffisante ou ne donne pas toutes les informations recherchées, le moyen le plus courant pour d'aller plus loin dans la connaissance du substratum est le forage de reconnaissance. Il est nécessaire pour :

- Planifier l'implantation des fondations d'un ouvrage (tunnel, pont, ...) ou d'un bâtiment important.
- Recueillir des informations sur les circulations des eaux souterraines (hydrogéologie).
- Suivre des pollutions du sol ou des eaux souterraines - investiguer la présence de ressources naturelles minérales.

### **IV.2.1.2. Principe de détection des zones karstique**

#### **IV.2.1.2.a. Présence de cavités ou de vides**

Quand on fore dans un terrain karstique, il peut arriver que l'outil de forage descende soudainement sans résistance, comme s'il tombait dans un trou. Cela signifie qu'il a rencontré une **cavité naturelle** sous la surface. Ces cavités sont fréquentes dans les zones karstiques, car l'eau dissout lentement la roche calcaire et forme des vides souterrains. Parfois, la tige du forage ne rencontre **aucune résistance** sur plusieurs mètres, ce qui confirme la présence d'un espace vide dans le sol (Perrin, Noury, & Cartannaz, 2014).

#### **IV.2.1.2.b. présence d'eau souterrain soudain**

Pendant le forage, il peut arriver que de l'eau **remonte brusquement** dans le trou. Cette montée rapide signifie souvent qu'on a atteint un **réseau souterrain d'eau**, comme une rivière ou une nappe dans une cavité karstique. Ces arrivées d'eau sont fréquentes dans les terrains karstiques où l'eau circule dans des galeries naturelles. C'est un signe clair que le sous-sol est actif et contient un **réseau karstique en fonctionnement** (Bakalowicz, 1999).

#### **IV.2.1.2.c. perte de fluide de forage**

Pendant un forage, on utilise souvent de la boue ou de l'eau pour faciliter le creusement. Si on remarque que ce liquide **disparaît brusquement** dans le sol, cela peut être un signe important. Cela indique que le fluide s'est **infiltré dans des fissures ou des conduits souterrains**, typiques des terrains karstiques. Ces pertes de fluide sont donc un indice clair que le sol est percé de **réseaux de circulation d'eau** ou de **galeries naturelles** (Maréchal et al., 2012).

### **IV.2.2. Le pénétromètre**

L'essai de pénétromètre est une méthode d'investigation géotechnique in situ qui consiste à enfoncer une pointe conique métallique dans le sol, soit de façon dynamique (par battage à l'aide d'une masse tombante), soit de façon statique (par poussée à vitesse constante), afin de mesurer la résistance du sol à la pénétration.

Cette résistance permet d'évaluer la compacité, la portance et la stratigraphie des différentes couches du sol (Lenoble & Martinaud, 2003).



Figure IV.6. penetrometre statique de 100 KN (Apageo, 2020)



Figure IV.7. Pénétrromètre statique manuel portable(Apageo, 2020)



Figure IV.8. pénétromètre dynamique lourd(SOLSOLUTION, 2023)

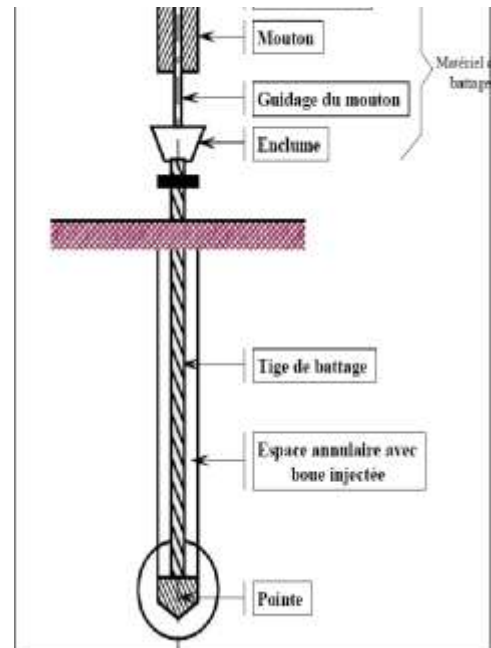


Figure IV.9. Schéma explicatif de pénétromètre dynamique

#### **IV.2.2.1. Principe et intérêt au karst**

L'essai pénétrométrique (statique ou dynamique) consiste à enfoncer une pointe conique dans le sol pour mesurer la résistance à la pénétration. En terrain karstique, il permet de repérer des anomalies de résistance, révélant la présence de vides, de cavités ou de zones décomprimées, typiques de ces milieux. L'analyse des résultats aide à localiser les hétérogénéités, à dimensionner les fondations, et à cartographier les risques de mouvements de terrain liés au karst (Lenoble & Martinaud, 2003).

#### **V.2.2.2. Utilisation spécifique en karst**

L'essai pénétrométrique est souvent couplé à d'autres méthodes (géophysique, forages) pour affiner la détection des cavités et mieux caractériser les zones à risque. Les variations soudaines de résistance mesurées par le pénétromètre sont des indices précieux pour la reconnaissance des terrains karstiques et la prévention des effondrements ou fontis (Lenoble & Martinaud, 2003).

#### **IV.2.2.3. Principe de détection des zones karstique.**

##### **IV.2.2.3.a. Changement brusque de la résistance**

Lors d'un essai pénétrométrique, on observe généralement une variation progressive de la résistance du sol avec la profondeur. En terrain karstique, ce comportement peut être perturbé : on note des **passages soudains entre des couches très résistantes**, comme la roche calcaire compacte, et des **couches très peu résistantes**, souvent constituées de **matériaux meubles ou remaniés**. Ces alternances brutales traduisent souvent la présence de **cavités partiellement ou totalement remplies** de sédiments meubles ou de matériaux érodés. Ce type de comportement est caractéristique des zones de **dissolution karstique**, où la roche a été localement remplacée par des remplissages hétérogènes (Lenoble & Martinaud, 2003)

##### **IV.2.2.3.b. Effondrement soudain de la tige**

Un autre indicateur important est le **comportement anormal de la tige du pénétromètre**. Dans un sol homogène, la pénétration se fait de manière continue et contrôlée. En revanche, dans un terrain karstique, la **tige peut s'enfoncer brutalement sur plusieurs centimètres, voire décimètres**, sans qu'aucun effort supplémentaire ne soit appliqué. Cela indique généralement que la tige a rencontré un **vide souterrain ou une cavité non comblée**, typique des structures karstiques. Cet effondrement soudain est une alerte forte qui justifie des investigations

complémentaires, car il peut signifier une **instabilité majeure du terrain**(Lenoble & Martinaud, 2003).

#### **IV.2.2.3.c. Résistance anormalement faible en profondeur**

En terrain calcaire ou rocheux, on s'attend à ce que la résistance du sol augmente nettement avec la profondeur, notamment lorsque la roche mère est atteinte. Si au contraire, l'essai montre une **résistance très faible à une profondeur où l'on s'attendait à trouver un substratum dur**, cela peut révéler une **zone de dissolution importante** dans la roche, ou la présence de **galeries karstiques**, vides ou remplies de matériaux mous. Ce phénomène indique une **perte de continuité du massif rocheux**, causée par des processus de corrosion chimique typiques du karst (Lenoble & Martinaud, 2003).

#### **IV.2.2.3. d. Manque de continuité entre les sondages**

Lorsqu'on effectue plusieurs essais pénétrométriques à différentes positions sur un site, on peut normalement établir une **corrélation entre les couches identifiées** dans chaque sondage. En terrain karstique, cette continuité est souvent absente : les profils obtenus varient fortement d'un point à un autre, même à quelques mètres de distance. Ce **manque de correspondance entre les sondages** traduit l'**hétérogénéité extrême** des terrains karstiques, où des zones de roche saine peuvent alterner brutalement avec des vides, des effondrements ou des remplissages meubles. Cette irrégularité est une signature typique du sous-sol karstifié (Lenoble & Martinaud, 2003).

#### **IV.2.1.1. Objectif de la méthode**

- Connaître la composition et la résistance du sol.
- Adapter la conception des fondations.
- Éviter les risques de tassement, d'effondrement ou d'instabilité.

### **IV.3. Prospection géophysique**

Les méthodes géophysiques d'investigation du terrain se sont fortement développées au cours des dernières décennies. Elles donnent des informations sur des paramètres physiques des milieux prospectés, paramètres qu'un géologue averti peut interpréter. Conformément au canevas décisionnel (Quinif et al., 2004), nous distinguerons quatre grands groupes de méthodes géophysiques.

- Les méthodes électriques (tomographie électrique, polarisation spontanée, etc.) renseignent sur la nature des terrains, leur caractère plus ou moins argileux ou plus ou moins humide (avec des effets très différents selon la teneur de l'eau en sels dissous).
- La micro-gravimétrie détecte les anomalies de gravité (jusqu'à un milliardième de la pesanteur), liées, par exemple, à des vides souterrains ; elle ne peut préciser le type de vide, mais localise avec beaucoup de précision l'anomalie.
- Les méthodes électromagnétiques (radar, etc.) détectent des contrastes de réponses électromagnétiques des terrains, parfois liés, par exemple, à des variations de l'humidité ou de la teneur en argile des formations traversées.
- Les méthodes sismiques, en testant les réactions du sol à des explosions, des chocs ou des vibrations, et en restituant le trajet des ondes, donnent des informations sur la succession des couches traversées et peuvent dans certains cas déceler des anomalies liées à des vides.

Toutes ces méthodes géophysiques sont dites "indirectes" en ce sens qu'elles ne renseignent en général pas directement la présence d'un vide ou d'un milieu karstifié. Elles donnent des informations sur des anomalies ou sur des variations de paramètres physiques qu'un géologue compétent peut interpréter de façon à élaborer une ou des hypothèses qu'on peut vérifier par une investigation directe (mécanique) (Quinif et al., 2004).

#### **IV.3.1. Les méthodes sismiques**

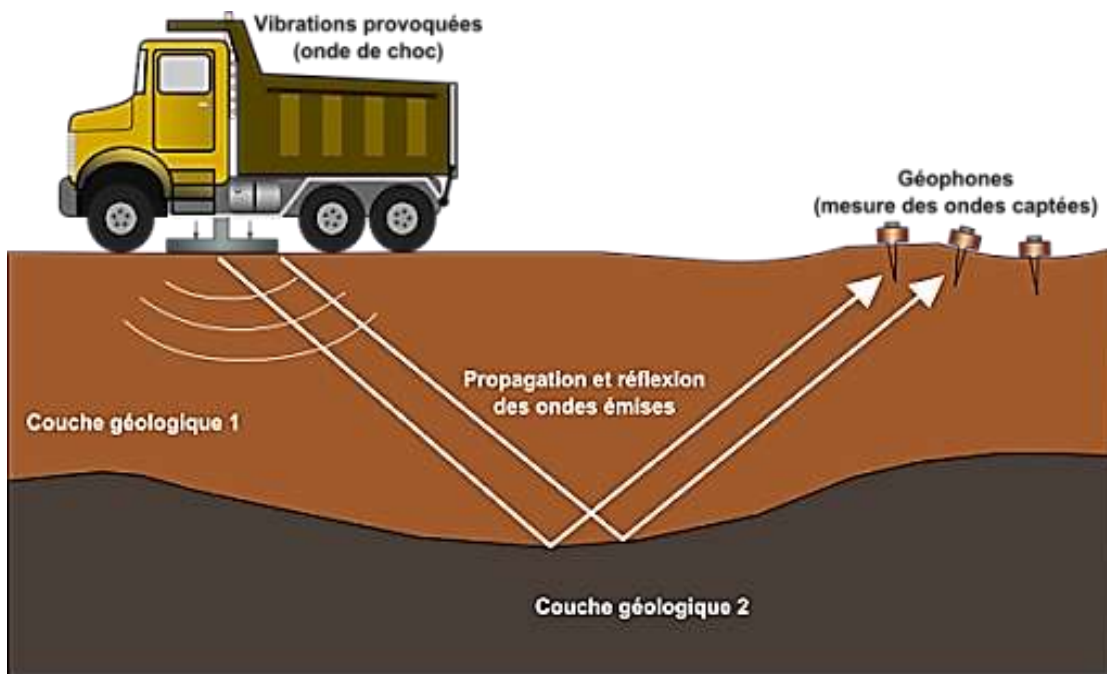
Les méthodes sismiques consistent à provoquer des secousses dans le sol, puis à observer à la surface les ondes qui se propagent suite à ces secousses. Au départ, ces techniques ont été créées pour rechercher du pétrole, et elles sont encore utilisées dans ce domaine. Depuis environ quinze ans, les progrès en technologie et en informatique ont permis d'utiliser ces méthodes pour détecter

des cavités souterraines. Les différents types de roches peuvent être reconnus grâce à la façon dont les ondes s’y déplacent.

L’énergie sismique se propage sous forme d’ondes qui s’étendent initialement en fronts d’onde hémisphériques. L’énergie arrivant à un géophone est décrite comme ayant suivi un trajet de rayon perpendiculaire au front d’onde, l’énergie sismique dans le sous-sol est réfractée (déviée) et/ou réfléchi aux interfaces entre des matériaux ayant des vitesses sismiques (Mooney, 1984).

Deux grands types d’ondes sont produits :

- Les ondes de volume, qui traversent le sous-sol et se réfléchissent ou se dévient quand elles rencontrent des couches de roches différentes.
- Les ondes de surface qui, comme leur nom l’indique, voyagent proche de la surface du sol.



**Figure IV.10.** Schéma explicatif de la méthode sismique(unit.eu, avril 2012).

La présence d’une cavité dans le sous-sol peut, sous certaines conditions physiques, constituer un obstacle à la propagation des ondes et entraîner des modifications de certains paramètres (temps de trajet, amplitudes et formes des signaux, vitesses de propagation des ondes, etc.) qui serviront de révélateurs de sa présence.

Les sources utilisées pour générer ces ondes peuvent être de plusieurs types : explosif, marteau, chute de poids, dispositif vibrant... Les ondes sont enregistrées par des géophones ou des accéléromètres (See Telford et al, 1990).

Différentes méthodes sismiques tirent parti des informations recueillies par ces ondes au cours de leur propagation dans le sol.

#### **IV.3.1.1. Sismique réfraction**

La sismique réfraction s'intéresse aux ondes réfractées le long des interfaces entre couches géologiques de vitesses différentes. Les vitesses de propagation et les profondeurs de ces couches peuvent être ainsi déterminées(Lankston, 1990).

- **Vitesses sismiques faibles**

Les zones affectées par le karst (cavités, fractures, altérations) se traduisent par un ralentissement des ondes P, générant des anomalies à basse vitesse. Par exemple, les calcaires altérés présentent des vitesses inférieures à 3 000 m/s, contre environ 5 000 m/s pour des calcaires compacts et sains(Lankston, 1990).

- **Retard de propagation (sur délai)**

Un allongement anormal des temps d'arrivée des ondes sismiques peut révéler la présence de cavités ou de zones très fracturées, qui ralentissent leur propagation(Lankston, 1990)

- **Atténuation du signal**

La diminution notable de l'amplitude des ondes réfractées est souvent liée à une forte absorption d'énergie dans les structures karstiques, en raison de la présence de vides ou de matériaux peu cohésifs(Lankston, 1990)

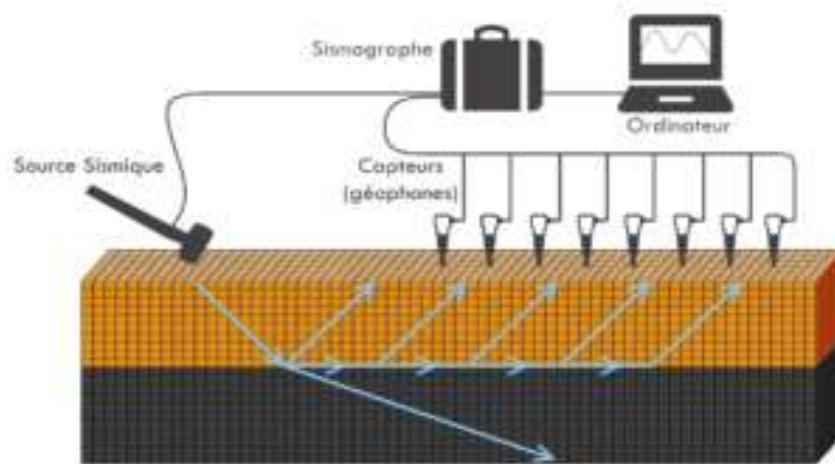


Figure IV.11. schéma de la sismique réflexion (unit.eu, avril 2012)

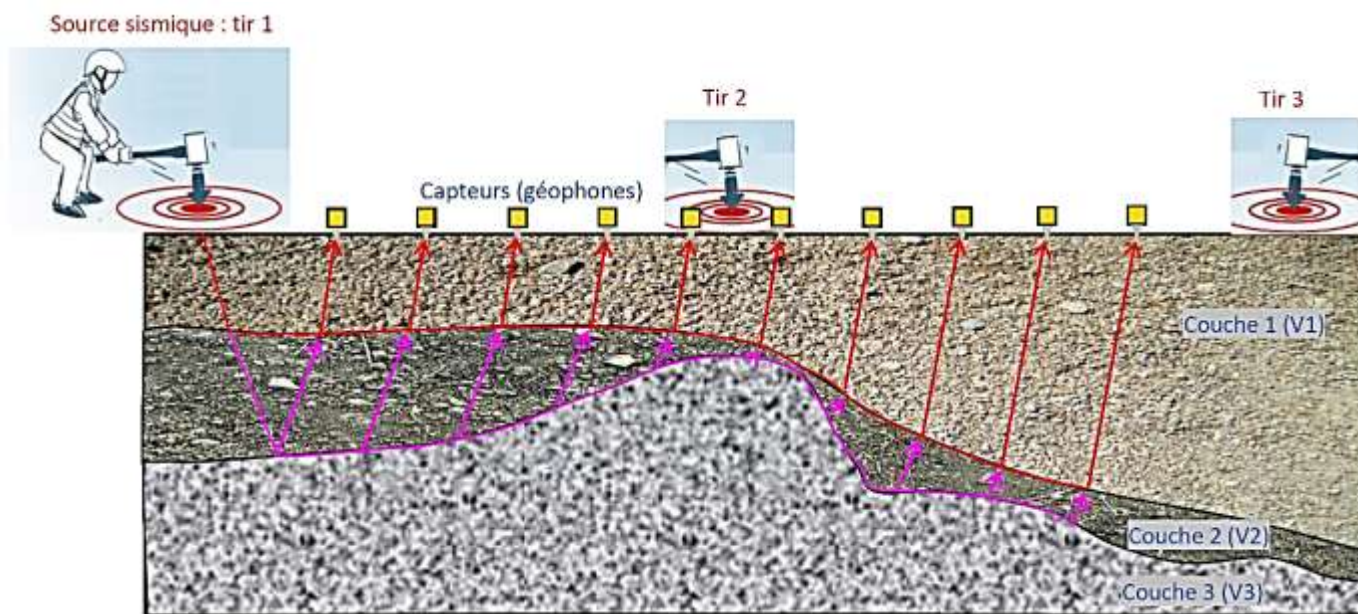


Figure IV.12. Schéma de principe de la sismique réfraction (geopat, mai 2010).

### IV.3.1.2. Sismique réflexion

La sismique réflexion haute résolution s'intéresse aux ondes de volume, principalement des ondes de compression (ondes P), qui se propagent dans le sous-sol et se réfléchissent sur les interfaces entre différentes couches géologiques présentant des contrastes d'impédance acoustique. Ces ondes réfléchies sont ensuite enregistrées en surface par un réseau de capteurs (géophones), permettant de reconstituer une image détaillée de la structure interne du sous-sol (MILLER & HENRIET, 1990).

La méthode de sismique réflexion permet de détecter les zones karstiques (cavités ou galeries dans la roche) en envoyant des ondes dans le sol et en enregistrant leur retour. Quand les ondes rencontrent une cavité, elles sont ralenties ou affaiblies, ce qui crée des anomalies visibles dans les données. Ces anomalies permettent de repérer les zones où la roche est creuse ou fissurée. Sur les images sismiques, ces zones apparaissent souvent sous forme de déformations ou de signaux moins clairs, ce qui aide à localiser les cavités cachées sous la surface.

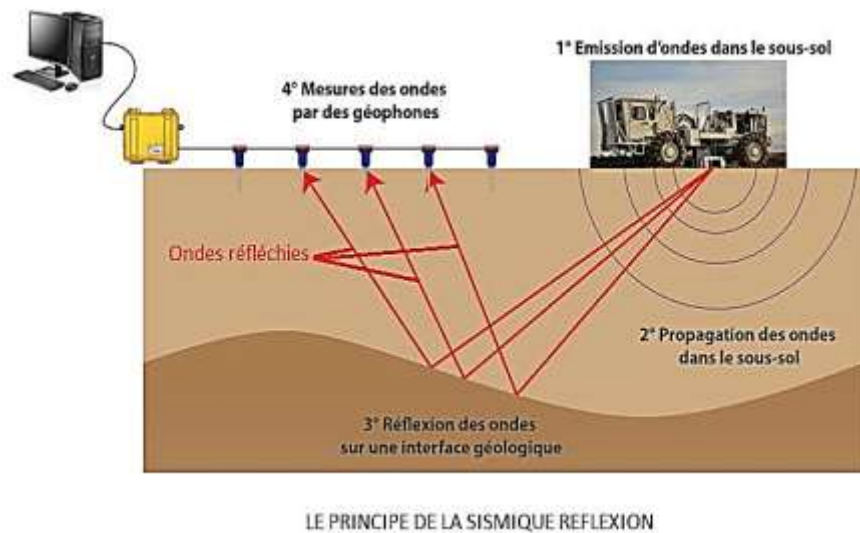


Figure IV.13. Principe de la sismique réflexion.

### **IV .3.1.3. SASW**

SASW signifie **Spectral Analysis of Surface Waves** (analyse spectrale des ondes de surface). C'est une méthode géophysique qui utilise des **ondes de surface** (pas des ondes réfléchies) pour mesurer la **vitesse des ondes de cisaillement (Vs)** dans le sol (Poiraud et al., 2008).

Les ondes de cisaillement vont plus lentement dans ces zones molles ou vides. Sur le profil de vitesse Vs, on voit des baisses brusques de vitesse, ou des anomalies.

### **IV .3.2. Les méthodes électriques**

Les méthodes électriques en géophysique sont des techniques d'exploration du sous-sol basées sur la mesure de la propagation du courant électrique à travers les différentes formations géologiques, Elles exploitent le fait que chaque type de roche ou de sol possède une résistivité électrique spécifique, permettant ainsi de distinguer les différentes couches ou structures souterraines selon leurs propriétés électriques (Poiraud et al., 2008).

#### **Principe de la méthode**

- On injecte un courant électrique connu dans le sol à l'aide de deux électrodes (électrodes de courant).
- On mesure la différence de potentiel générée entre deux autres électrodes (électrodes de potentiel).
- Le rapport entre la différence de potentiel et l'intensité du courant, corrigé par un facteur géométrique lié à la disposition des électrodes, permet de calculer la résistivité apparente du sous-sol.

Les méthodes électriques sont particulièrement utiles pour identifier les différentes structures géologiques présentes dans le sous-sol, telles que les couches, les failles, les cavités ou encore les nappes phréatiques. Elles sont également largement employées dans la recherche d'eau souterraine, de minerais, ainsi que pour la détection d'anomalies comme des zones polluées ou des vestiges archéologiques. Grâce à leur capacité à révéler les variations de résistivité entre les matériaux, ces techniques permettent d'obtenir des informations précieuses pour de nombreux

domaines, allant de l'hydrogéologie à l'archéologie, en passant par l'environnement et l'exploitation minière (Poiraud et al., 2008).

Les méthodes électriques les plus couramment utilisées en géophysique incluent principalement les sondages électriques verticaux (SEV), les profils de résistivité, ainsi que diverses configurations d'électrodes telles que Schlumberger, Wenner et dipôle-dipôle. Cette technique permet de mesurer la résistivité du sous-sol en profondeur à partir d'un point fixe. Elle repose sur l'utilisation d'un quadripôle d'électrodes : deux servent à injecter un courant électrique dans le sol, tandis que les deux autres mesurent la différence de potentiel générée. En écartant progressivement les électrodes, on accède à des profondeurs croissantes, ce qui permet d'explorer la stratification verticale du sous-sol. Le SEV fournit ainsi une coupe verticale de la résistivité, utile pour identifier les différentes couches géologiques, localiser des aquifères, détecter des failles ou encore caractériser des zones de stockage souterrain. L'analyse des données permet ensuite de modéliser la répartition des résistivités et des épaisseurs des couches rencontrées sous le point de mesure (Poiraud et al., 2008).

#### **IV .3.2.1. Profils de résistivité**

À la différence du SEV qui analyse la variation verticale, le profilé de résistivité consiste à déplacer le dispositif d'électrodes le long d'une ligne à la surface du sol tout en maintenant un écartement constant. Cette approche permet de cartographier les variations latérales de la résistivité, facilitant ainsi la détection de structures telles que des failles, des cavités ou les limites des nappes phréatiques sur une large zone (Poiraud et al., 2008).

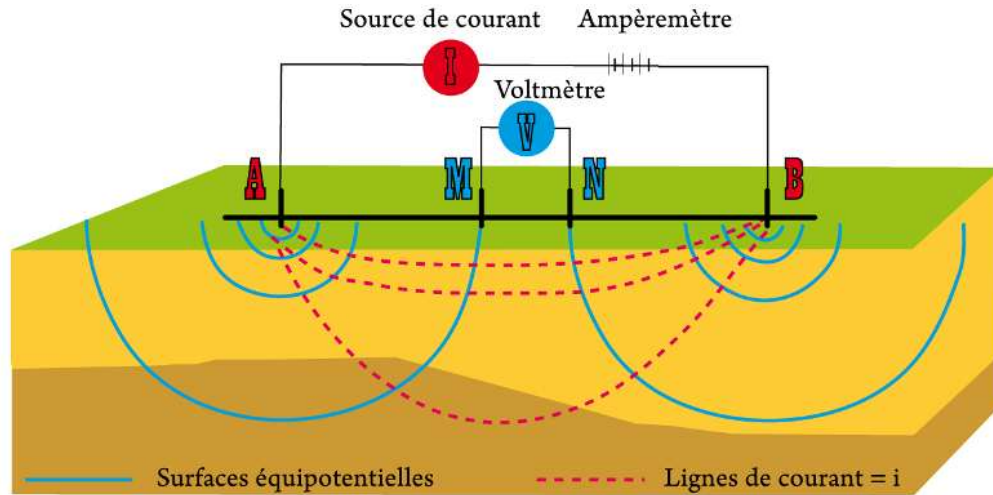


Figure IV.14. Principe de la méthode électrique (gexplore, 14 decembre 2016)

#### IV .3.2.2. Dispositifs classiques (Schlumberger, Wenner, dipôle-dipôle)

Ces dispositifs désignent différentes configurations d'électrodes employées pour injecter le courant et mesurer la tension.

- **Schlumberger** : Ce dispositif est largement utilisé pour les sondages verticaux, car il permet d'atteindre de grandes profondeurs tout en offrant une bonne sensibilité.
- **Wenner** : Apprécié pour sa simplicité et sa capacité à fournir des mesures reproductibles, le dispositif Wenner est souvent utilisé dans les profils de résistivité

- **Dipôle-dipôle** : Ce dispositif est particulièrement adapté à la cartographie des structures latérales, en particulier pour la tomographie électrique, grâce à sa sensibilité aux variations horizontales de la résistivité (Poiraud et al., 2008).

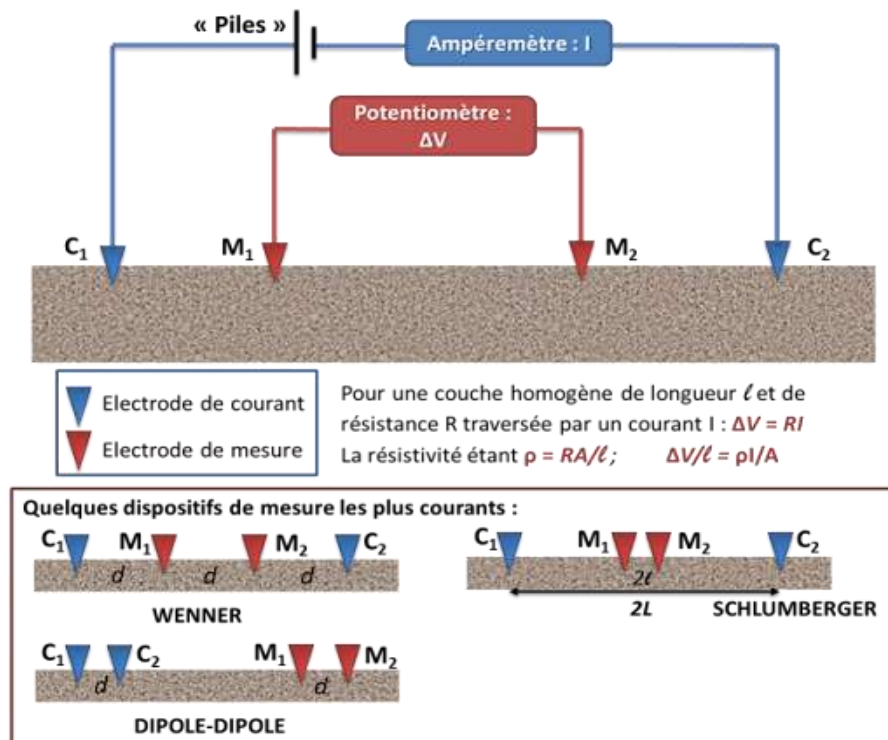


Figure IV.15. Principe et dispositif de la méthode Electric (gexplore, 14 decembre 2016).

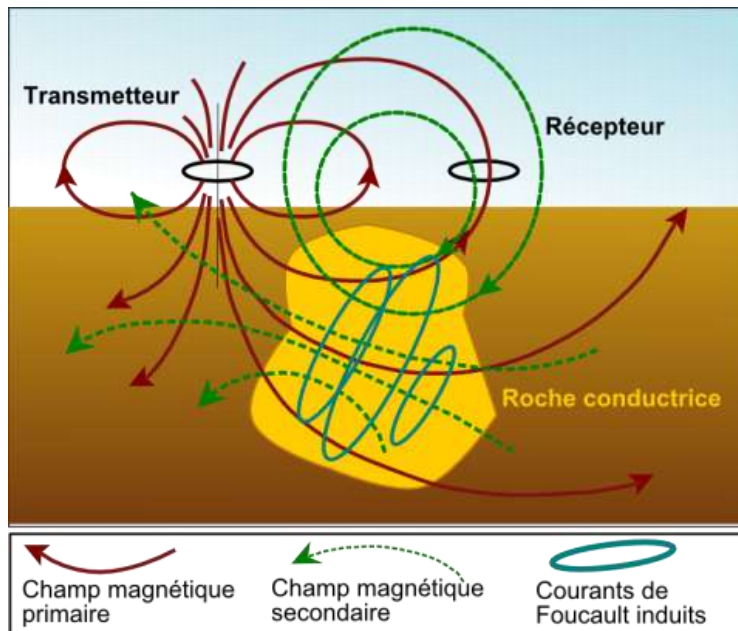
Ces différentes méthodes sont complémentaires et le choix de l'une ou l'autre dépend des objectifs spécifiques de l'étude géophysique, de la nature du terrain et de la profondeur souhaitée pour l'investigation.

Les méthodes électriques sont particulièrement efficaces pour détecter les zones karstiques, notamment grâce à l'analyse de la résistivité du sous-sol. Les cavités karstiques, souvent remplies d'air ou d'eau, présentent des contrastes de résistivité marqués par rapport aux roches environnantes. Par exemple, une cavité vide aura une résistivité élevée, tandis qu'une cavité remplie d'eau ou de sédiments affichera une résistivité différente, dépendant de la nature de son contenu.

Des techniques telles que les sondages électriques verticaux (SEV) et la tomographie de résistivité électrique permettent de localiser ces anomalies. En pratique, l'élaboration de profils ou de modèles 3D de résistivité permet de mettre en évidence des zones où la résistivité varie de manière significative, ce qui peut indiquer la présence de cavités ou de réseaux karstiques. La validation de ces anomalies par d'autres méthodes géophysiques ou par des données de forage permet ensuite de confirmer leur nature karstique.

### **IV.3.3. Les méthodes électromagnétiques**

Les méthodes électromagnétiques en géophysique regroupent un ensemble de techniques qui exploitent les champs électromagnétiques pour explorer et analyser les propriétés du sous-sol. Elles reposent sur l'interaction entre les ondes électromagnétiques et les matériaux souterrains, permettant de détecter les variations de conductivité électrique, de permittivité, et parfois de susceptibilité magnétique (Goldscheider & Drew, 2014).



**Figure IV.16.** Principe de la méthode électromagnétique (unit.eu, avril 2012).

Le principe de base consiste à générer un champ électromagnétique à la surface (via un émetteur), ce qui induit des courants électriques dans les structures conductrices du sous-sol. Ces courants

créent un champ électromagnétique secondaire, qui est ensuite mesuré par des capteurs placés en surface ou en forage. Selon la fréquence utilisée, on distingue les méthodes en **domaine temporel** (TDEM), en **domaine fréquentiel** (FDEM), ainsi que le **géoradar** (GPR), qui utilise des ondes radar à haute fréquence pour obtenir des images du sous-sol à faible profondeur (Goldscheider & Drew, 2014).

Les méthodes électromagnétiques sont couramment utilisées pour la cartographie des structures géologiques, la détection de failles, de cavités, de nappes phréatiques, de minerais, ainsi que pour diverses applications environnementales et archéologiques.

Les méthodes électromagnétiques sont largement utilisées pour détecter les zones karstiques, car elles permettent d'identifier les cavités et les vides souterrains grâce aux contrastes de conductivité ou de permittivité entre les roches et l'air ou l'eau présents dans ces structures. Parmi ces techniques, le géoradar (GPR) se distingue particulièrement pour localiser les karsts peu profonds : il émet des ondes électromagnétiques dans le sol et analyse les réflexions provoquées par des changements brusques de matériau, comme la transition d'une roche compacte à une cavité. Ces cavités karstiques apparaissent alors comme des anomalies sur les profils radar, ce qui permet de déterminer leur emplacement et leur profondeur (Goldscheider & Drew, 2014).

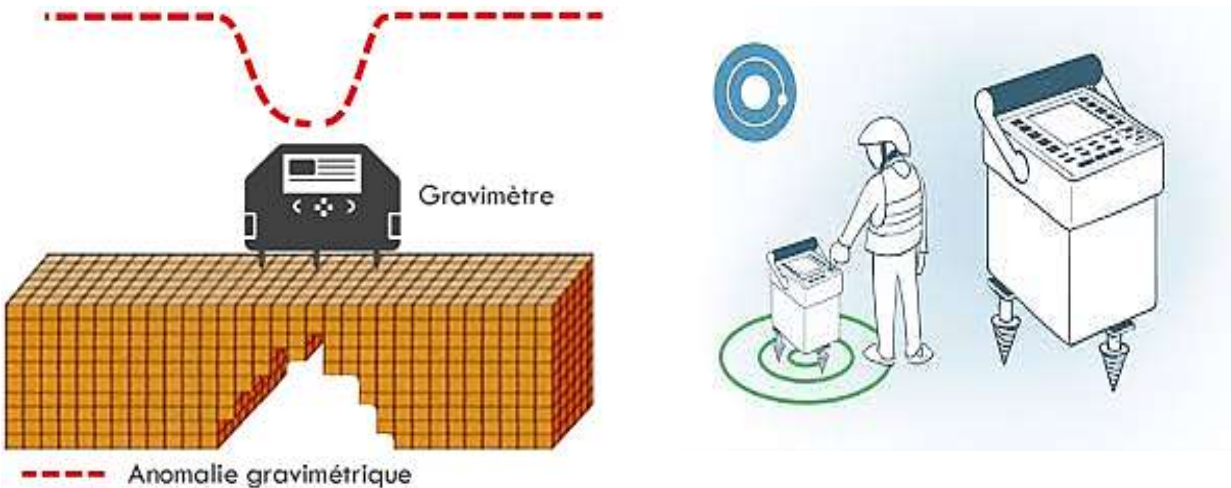
D'autres techniques électromagnétiques, telles que le profilage électromagnétique à basse fréquence (VLF-EM) ou la magnétotellurique, sont également utilisées pour explorer des profondeurs plus grandes et détecter des anomalies de conductivité liées aux réseaux karstiques. Le choix de la méthode dépend de la profondeur d'investigation nécessaire et des caractéristiques du terrain. En résumé, les méthodes électromagnétiques constituent des outils puissants pour la détection et la cartographie des zones karstiques, souvent en complément d'autres techniques géophysiques (Goldscheider & Drew, 2014).

#### **IV.3.4. Les méthodes de La micro-gravimétrie**

La micro-gravimétrie est une méthode géophysique qui consiste à mesurer avec une précision extrême les variations locales du champ de pesanteur à la surface du sol, en différents points d'une zone d'étude. Ces variations permettent d'identifier les différences de densité dans le sous-sol, ce qui aide à détecter des excès ou des déficits de masse, tels que des cavités, des zones karstiques ou

des structures enterrées. Les mesures sont réalisées à l'aide d'un micro-gravimètre, un appareil très sensible capable de détecter des anomalies de l'ordre du microgal ( $\mu\text{gal}$ ), correspondant à des variations minimales de l'accélération de la pesanteur. La micro-gravimétrie est particulièrement utile pour la détection de cavités, de vides ou de zones décomprimées dans le sous-sol, et elle est employée dans des domaines variés, tels que la géotechnique, l'archéologie et la prospection minière (Poiraud et al., 2008).

La micro-gravimétrie permet de détecter les zones karstiques en mesurant avec une grande précision les variations locales du champ de pesanteur à la surface du sol. Les cavités karstiques, qui correspondent à des vides ou à des zones décomprimées dans le sous-sol, génèrent des anomalies gravimétriques négatives en raison de leur densité inférieure à celle des terrains environnants (Poiraud et al., 2008).



**Figure IV.17.** Principe de la méthode de microgravimétrie (geopat, mai 2010).

Pour localiser ces zones, un maillage dense de points de mesure est réalisé sur la zone d'étude. Après correction des mesures pour tenir compte de facteurs tels que le relief, la latitude et les effets instrumentaux, on obtient une carte des anomalies gravimétriques. Les zones où la gravité mesurée est inférieure à la normale suggèrent la présence de cavités ou de réseaux karstiques. La modélisation numérique de ces anomalies permet ensuite d'estimer la taille, la profondeur et la forme des structures détectées (Poiraud et al., 2008).

Ainsi, la micro-gravimétrie se révèle être une méthode non destructive et particulièrement efficace pour localiser et caractériser les zones karstiques, notamment dans le cadre de projets d'aménagement ou de prévention des risques d'effondrement.

#### **IV.4. Conclusion**

L'étude des zones karstiques nécessite une approche d'investigation rigoureuse et adaptée, en raison des risques importants qu'elles présentent pour les projets d'infrastructure. La présence de vides, de cavités, de fissures et de poches d'altération rend ces terrains particulièrement hétérogènes et imprévisibles. Pour cette raison, il est indispensable de combiner des méthodes de prospection géotechniques et géophysiques afin d'obtenir une vision claire et fiable du sous-sol.

Les investigations géotechniques, comme les forages, les essais pressiométriques, les essais de perméabilité ou les essais au pénétromètre, permettent une exploration directe du sol et fournissent des informations précises sur la nature et la résistance des matériaux traversés. Elles sont essentielles pour confirmer la présence de zones karstifiées détectées ou suspectées.

De leur côté, les méthodes géophysiques, notamment la tomographie électrique, la sismique, le géoradar ou la gravimétrie, offrent une reconnaissance rapide, non destructive et sur de grandes surfaces. Elles sont particulièrement utiles pour repérer des anomalies liées à des cavités ou des zones de faiblesse, et pour guider le positionnement des forages.

Seule une approche intégrée et complémentaire, combinant ces deux types de prospections, permet de réduire les incertitudes et de mieux anticiper les risques liés au karst. Cette reconnaissance approfondie est une étape clé dans la réussite des projets d'infrastructures en zones karstiques, car elle garantit une meilleure conception des fondations et une sécurité accrue des ouvrages à long terme.

**Chapitre V**  
**Incidences en termes de génie civil \_**  
**(processus d'instabilité liés au karst.**  
**Exemples de cas : affaissements,**  
**effondrements, inondations et pollutions)**

## V.1. Introduction

Les zones karstiques, sont des zones très fragiles, représentent un souvent fin difficile pour le développement des infrastructures. Ces formations géologiques aux spécificités, conditionnées par leur solubilité et leur forte hétérogénéité se prêtent à des risques particuliers et reproduisent ainsi une influence directe sur la conception, la construction et la durabilité des ouvrages de génie civil (Aït-Mokhtar et al., 2011).

Lorsque des projets de génie civil (bâtiments, routes, barrages, réseaux d'assainissement, etc.) sont implantés dans de telles zones, ils peuvent être directement affectés par ces instabilités naturelles, parfois exacerbées par les activités humaines elles-mêmes. Les conséquences peuvent être graves, allant de dommages structurels coûteux à des risques majeurs pour la sécurité des biens et des personnes, ainsi que pour l'environnement.

Ce chapitre se propose d'examiner les principales incidences en termes de génie civil liées aux processus d'instabilité spécifiques aux milieux karstiques. Nous aborderons en détail, à travers des mécanismes explicatifs et des exemples concrets, quatre types de problèmes majeurs fréquemment rencontrés :

1. **L'affaissement (subsidence)** : Mouvement lent et progressif du sol résultant de la compaction ou de la dissolution en profondeur.
2. **L'effondrement** : Rupture brutale du toit de cavités souterraines, créant des dépressions soudaines en surface (dolines d'effondrement).
3. **Les inondations** : Phénomènes de crues rapides et souvent imprévisibles liés à la saturation du réseau karstique ou à l'obstruction des exutoires.
4. **Les pollutions** : Vulnérabilité accrue des aquifères karstiques due à la circulation rapide de l'eau (et des contaminants) dans les conduits, court-circuitant les processus naturels de filtration du sol.

L'objectif est de fournir aux ingénieurs et aux aménageurs les clés pour comprendre ces phénomènes, identifier les zones à risque, et appréhender les défis spécifiques que pose la construction et la gestion des infrastructures en contexte karstique. Une meilleure connaissance de

ces incidences est essentielle pour une conception adaptée, une gestion durable des ressources et la prévention des risques associés.

## **V. 2. Processus d'instabilité liés au karst**

Le développement karstique est un phénomène naturel de corrosion de la roche édifiante par l'eau en raison de la dissolution progressive de la roche soluble. Cette dissolution provoque des cavités souterraines, non visibles de la surface. Lorsque ces vides arrivent à un certain volume, la stabilité mécanique du sol est en cause. Des instabilités diverses peuvent alors survenir ; affaissements lents, effondrements sismiques, variations hydriques et pollutions. Ces phénomènes sont précisément encouragés par les activités humaines, qui tronquent les milieux (Noury et al., 2020).

L'instabilité du sol en contexte karstique, qu'elle soit progressive ou brutale, constitue un défi majeur pour le génie civil. Ces phénomènes résultent de l'interaction dynamique entre les vides karstiques, les terrains de couverture et les activités humaines (D. Waltham, 2015).

## **V.3. Types d'instabilité liés au karst**

### **V.3.1. Affaissement progressif**

Il s'agit d'un enfoncement lent et graduel du sol, causé par l'effondrement partiel de cavités. Ce processus peut passer inaperçu pendant longtemps avant de générer des dommages visibles sur infrastructures.

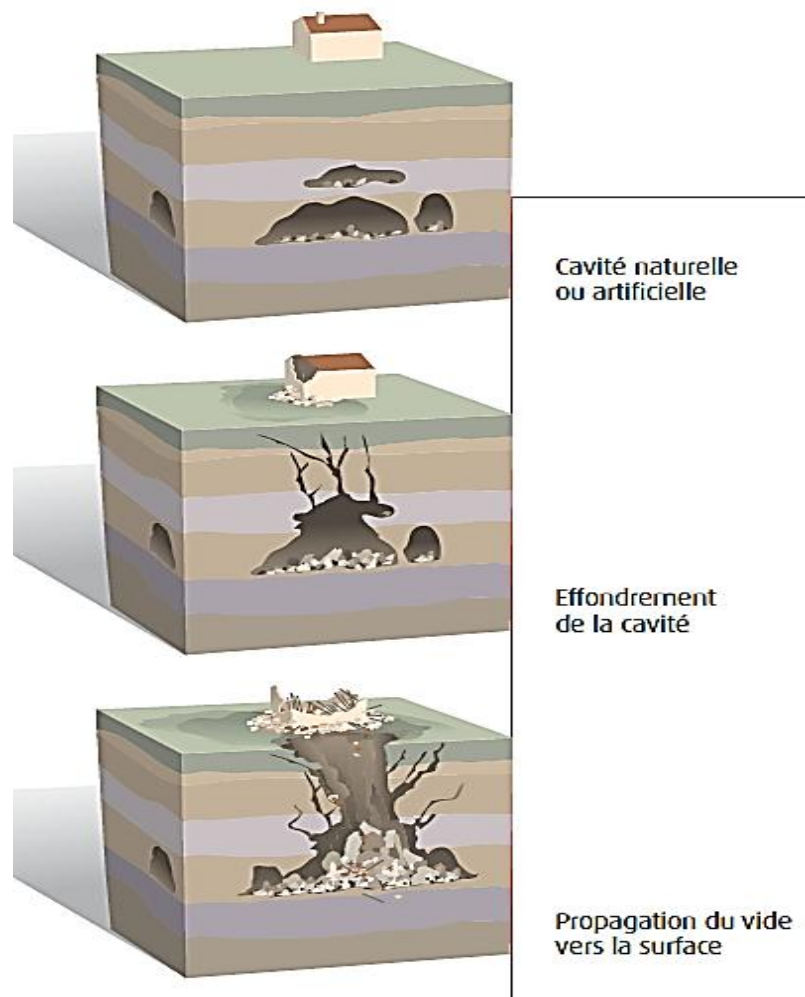
L'affaissement se produit sans ouverture de cavité, même si des failles et des fissures peuvent apparaître.

Un affaissement conduit à une dépression aux pentes peu marquées, sans rupture des terrains. Les affaissements sont considérés comme des mouvements lents, pouvant évoluer pendant plusieurs années, voire dizaines d'années, ce qui limite souvent l'observation de leur apparition et de leur évolution. Conséquences (biens et personnes) (Falcone et al., 2004).

### **V.3.2. Effondrement brutal**

Un effondrement aboutit à une dépression marquée aux bords francs (cratère, fontis, perte), avec une rupture des terrains. Alors que leur maturation peut être longue, leur apparition en surface est souvent soudaine (quelques secondes à quelques heures).

Lorsque la voûte d'une cavité souterraine ne peut plus supporter la charge du sol sus-jacent, elle s'effondre brutalement, créant un trou béant en surface, parfois de plusieurs mètres de profondeur. On observe une dégradation des galeries qui peut gagner de proche en proche vers le haut. Les terrains sus-jacents s'effondrent jusqu'à provoquer une vaste ouverture à l'air libre ou fontis (Falcone et al., 2004).



**Figure.V.1.** Schéma explicative d'un effondrement (ONEMA BRGM, 2010).



**Figure.V.2.** Effondrement à Gagny en 1974 (Barres & Lallemand-Barrès, 1988).

### V.3.3. Inondations karstiques

En cas de fortes précipitations, les réseaux karstiques souterrains peuvent être saturés, entraînant des remontées brutales d'eau et des inondations importantes en surface.

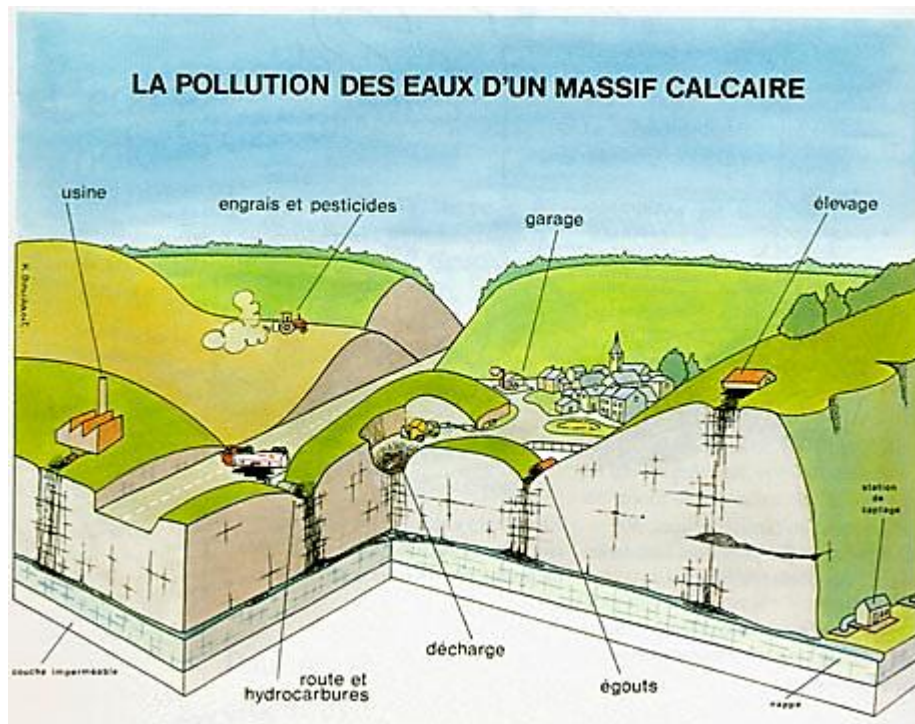


**Figure.V.3.** Représentation d'une inondation (FANUEL, 2011).

### V.3.4. Pollution rapide

En raison de la forte perméabilité des terrains karstiques, les polluants (hydrocarbures, eaux usées, produits chimiques) peuvent s'infiltrer rapidement vers les nappes phréatiques, contaminant l'eau potable sans processus naturel de filtration.

Ces processus rendent le karst imprévisible, et renforcent l'importance d'une bonne connaissance du sous-sol avant tout projet d'infrastructure (ONF BRGM, 2018).



**Figure.V.4.** Différentes pollutions pouvant affecter un massif calcaire (campagne de sensibilisation CNPSS-1988).

## V.4. Incidences en termes de génie civil : Processus d'instabilité liés au karst et exemples de cas

Dans les zones karstiques, les infrastructures sont exposées à plusieurs types de risques directs, chacun pouvant gravement compromettre leur sécurité et leur fonctionnement :

### V.4.1. Affaissements et tassements du sol

#### V.4.1.1. Déformation des infrastructures

Les affaissements peuvent entraîner la déformation des structures en surface. Cela peut se

traduire par des fissures dans les murs, une inclinaison des bâtiments, des routes ou des ponts, altérant leur stabilité et sécurité. Les fondations peuvent s'affaisser, créant ainsi des déséquilibres dans la structure (T. Waltham, Bell, & Culshaw, 2005a)



**Figure.V.5.** inclinaison célèbre de la tour de pise due à un affaissement du terrain marneux (Donato, 23 decembre 2010).

#### **V.4.1.2. Instabilité des fondations**

Lorsqu'un affaissement se produit, les fondations, qui sont censées reposer sur un sol solide, se retrouvent sur un terrain instable. Cela affaiblit l'ensemble de la structure, car le sol ne peut plus soutenir la charge de manière uniforme et stable (Gourc & Stoltz, 2007).



**Figure.V.6.** Affaissement de la fondation et dallage(GEOSEC, 2018)



**Figure.V.7.** Affaissement et fissure de la fondation(BEBEXPERTS, 25 mars 2019).

#### V.4.1.3. Dégradation des routes et des ponts

Dans les zones karstiques, le sol peut s'affaisser lentement sous le poids des infrastructures. Cela provoque des déformations visibles sur les routes, comme des fissures, des affaissements de chaussée ou des ondulations. Ces défauts rendent la circulation difficile, voire dangereuse, surtout pour les véhicules lourds ou rapides.

Les ponts, quant à eux, peuvent subir un désalignement si une pile repose sur une zone instable. Cela peut fragiliser l'ensemble de la structure et nécessite des inspections régulières pour éviter les accidents (Dugan, Hubbard, McCrary, & Pierson, 2003).



**Figure. V.8.** Une route affaissée en Mayenne (FRANCE, 25 janvier 2021).

#### V.4.1.4. Endommagement des réseaux enterrés

Les réseaux souterrains comme les canalisations d'eau potable, les conduites de gaz, les câbles électriques ou les égouts sont très sensibles aux mouvements du sol. Lorsque le terrain s'affaisse, ces installations peuvent se tordre ou se casser. Une canalisation d'eau peut fuir ou exploser, un câble électrique peut être endommagé, provoquant des coupures d'électricité. Ces dégâts entraînent non seulement des perturbations mais peuvent aussi présenter des risques pour la sécurité des habitants. (Dugan et al., 2003).

#### V.4.1.5. Interruption de services

Quand une infrastructure est touchée par un affaissement important, elle peut devenir inutilisable. Par exemple, une route fissurée peut être fermée à la circulation, une école peut être évacuée pour des raisons de sécurité, ou un hôpital peut voir ses services ralentis. Ces interruptions ont des conséquences directes sur la vie des habitants, car elles perturbent les déplacements, l'accès aux soins, à l'éducation ou à d'autres services essentiels (Dugan et al., 2003).

#### V.4.2. Effondrement

##### V.4.2.1. Destruction soudaine des infrastructures

Quand un effondrement se produit sous une route, un bâtiment ou un pont, la structure peut s'effondrer complètement en quelques secondes. Ce phénomène est fréquent en zones karstiques où les cavités souterraines peuvent céder sans prévenir. Ce type d'accident représente un grand danger pour les personnes et les véhicules présents sur place au moment de l'événement (T. Waltham, Bell, & Culshaw, 2005b).



**Figure.V.9.** Effondrement karstique a Guatemala 2013(plume-webmag, 2019).



**Figure.V.10.** Effondrement à Saint-Pryvé-Saint-Mesmin en 2010 (45) - cliché DDT45(E. Husson, 2010).



**Figure.V.11.** le pont de Chamborigaud s'est effondré le 18 mars 2024(Casez, 2024)

#### V.4.2.2. Danger pour la sécurité publique

Ce phénomène est très dangereux car il arrive souvent sans signes visibles à l'avance. Des vies

humaines peuvent être en danger si l'effondrement se produit dans une zone habitée ou fréquentée. Cela oblige souvent les autorités à évacuer des quartiers entiers pour éviter tout risque (Ford & Williams, 2007).

#### **V.4.2.3. Fragilisation des constructions voisines**

Même si l'effondrement ne touche pas directement une infrastructure, les vibrations et les mouvements de sol peuvent affecter les bâtiments voisins. Des fissures peuvent apparaître, les fondations peuvent se déplacer, rendant certaines constructions instables ou inhabitables (M Parise & Lollino, 2011).

#### **V.4.2.4. Réparations complexes et coûteuses**

La reconstruction après un effondrement demande beaucoup de moyens. Il faut d'abord combler la cavité avec des matériaux solides comme du béton, puis reconstruire l'infrastructure. Cela peut prendre du temps et coûter très cher, surtout si les réseaux d'eau, de gaz ou d'électricité ont aussi été touchés (Mario Parise, Pisano, & Vennari, 2018).

L'effondrement d'ouvrages et d'infrastructures constitue un sujet préoccupant qui mérite notre attention. Qu'il s'agisse de ponts, de bâtiments, ou de routes, ces structures sont essentielles à notre quotidien. Mais leur défaillance peut avoir des conséquences dramatiques.

Les raisons derrière l'effondrement des infrastructures sont multiples et souvent interconnectées : Les routes, ponts, ou parkings construits au-dessus de cavités peuvent s'effondrer brutalement, provoquant des accidents majeurs et des interruptions de service.

### **V.4.3. Inondations**

Les réseaux karstiques permettent une circulation rapide de l'eau. Lors d'événements pluvieux importants, cette eau peut remonter par les cavités et envahir les tunnels, les caves, ou encore provoquer des dégâts dans les stations de pompage.

#### **V.4.3.1. Remontée d'eau soudaine par le sol**

Dans certaines zones karstiques, l'eau ne déborde pas toujours des rivières comme dans les inondations classiques. Elle peut remonter soudainement par les fissures, les puits ou les cavités,

parfois même dans les caves ou les rues. C'est ce qu'on appelle une "remontée karstique". Ce phénomène est difficile à prévoir et peut endommager des bâtiments ou bloquer des routes (Naughton et al., 2018).

#### **V.4.3.2. Réseaux d'évacuation souvent inefficaces**

Les systèmes classiques de drainage (caniveaux, égouts) ne sont pas toujours adaptés aux zones karstiques. L'eau peut circuler de façon imprévisible dans le sous-sol, ce qui rend difficile la gestion des eaux pluviales. En génie civil, il faut donc concevoir des réseaux d'évacuation spécifiques et prévoir des bassins de rétention ou des pompes pour limiter les dégâts (Naughton et al., 2018).

#### **V.4.3.3. Dommages aux infrastructures**

Les inondations karstiques peuvent affaiblir les fondations des bâtiments, surtout si l'eau s'infiltré et stagne sous les structures. Cela peut causer des fissures, des affaissements ou même des mouvements de terrain. Les routes et les ponts peuvent aussi être submergés ou rendus glissants et dangereux, nécessitant des réparations fréquentes (Naughton et al., 2018).



**Figure.V.12.** Dégâts des inondations à Pepinster (Belgique)

(Christophe Licoppe, 17 July 2021).



**Figure.V.12.** Un tunnel inondés à Kinkempois(hartia, 21 juillet 2021).

#### **V.4.4. Pollution des nappes phréatiques**

Les nappes karstiques sont particulièrement vulnérables aux contaminations, car les polluants peuvent voyager sans filtration naturelle. Cela pose un risque sanitaire direct pour les projets utilisant l'eau souterraine.

**Instabilité des remblais et des ouvrages en terre :** Les structures comme les digues, barrages ou remblais ferroviaires peuvent être fragilisées par la dissolution karstique sous-jacente, compromettant leur rôle de protection.

Ces risques imposent aux projets de génie civil en zone karstique de développer des stratégies adaptées, basées sur l'étude du sous-sol, des méthodes de construction spéciales, et une surveillance continue pendant toute la durée de vie de l'ouvrage.

##### **V.4.4.1. Présence de cavités et de failles**

Dans les zones karstiques, le sol contient de nombreuses cavités naturelles formées par la dissolution de la roche calcaire. Ces cavités (comme les dolines ou les conduits souterrains) créent un lien direct entre la surface et la nappe phréatique. Par conséquent, les polluants qui pénètrent dans le sol peuvent rapidement atteindre les eaux souterraines sans obstacle. Cela rend ces milieux extrêmement sensibles aux contaminations (Ford & Williams, 2007)

##### **V.4.4.2. Absence de filtration naturelle**

Contrairement aux sols riches en argile ou en sable, les terrains karstiques ne disposent pas de couches filtrantes capables de retenir les polluants. L'eau s'infiltré directement dans les fissures et les cavités, sans subir de processus de purification naturelle. Cela permet aux contaminants d'atteindre très rapidement les nappes phréatiques, posant un grave danger pour la qualité de l'eau potable (Gilli, 1999).

#### **V.4.4.3. Circulation rapide de l'eau**

La vitesse de circulation de l'eau dans un karst est beaucoup plus élevée que dans les milieux classiques. L'eau chemine à travers des conduits très ouverts, parfois à la vitesse de plusieurs centaines de mètres par jour. Cela signifie qu'un polluant peut se déplacer sur de longues distances en très peu de temps, rendant difficile toute tentative de confinement ou de dépollution (Drew & Hötzl, 1999).

#### **Problèmes techniques pour les ingénieurs**

##### **V.4.4.4. Contamination des nappes phréatiques**

Dans les zones karstiques, les nappes phréatiques sont directement connectées au réseau de fissures et de cavités souterraines. Cela signifie que tout polluant déversé en surface – comme les nitrates issus de l'agriculture, les eaux usées urbaines ou les produits chimiques industriels – peut rapidement atteindre la nappe sans être filtré. De nombreuses études ont montré que les aquifères karstiques sont beaucoup plus vulnérables aux pollutions que les aquifères poreux classiques, car l'eau s'y infiltre rapidement sans subir de processus d'autoépuration (Ford & Williams, 2007).

##### **V.4.4.5. Affaissements et instabilité des sols**

Le karst est naturellement instable à cause des nombreuses cavités souterraines qui peuvent s'effondrer avec le temps. Si une infrastructure (comme une route, un tunnel ou un bâtiment) est construite au-dessus d'un vide non détecté, un effondrement peut causer de graves dégâts. Parfois, ces effondrements sont soudains et spectaculaires, formant des cratères en surface, appelés « sinkholes ». De plus, un tel affaissement peut aussi libérer des polluants enfouis dans le sol, en les mettant directement en contact avec les nappes phréatiques (Drew & Hötzl, 1999).

##### **V.4.4.6. Traitement difficile de l'eau**

Lorsque l'eau d'un karst est contaminée, la rendre potable devient un véritable défi technique. Elle peut contenir des bactéries, des nitrates ou même des substances toxiques qui ne peuvent pas être éliminées par de simples traitements. Il faut donc utiliser des techniques avancées comme

la filtration sur charbon actif, l'ultrafiltration, ou encore le traitement par UV ou chlore. Ces technologies sont coûteuses, surtout dans les zones rurales ou isolées, et nécessitent un suivi rigoureux pour garantir la qualité de l'eau distribuée (Gilli, 1999).

## **V.5. Les solutions adaptées**

### **V.5.1. Effondrement**

#### **V.5.1.1. Études géophysiques et géotechniques**

Avant toute construction sur un terrain potentiellement karstique, il est essentiel de réaliser des études géophysiques (comme la tomographie électrique ou la sismique) pour détecter les cavités, fractures ou poches de vide. Ces études permettent de « voir » sous la surface sans creuser, ce qui est précieux pour éviter de bâtir sur un sol instable. Elles sont généralement complétées par des études géotechniques qui analysent la nature des sols et proposent des solutions d'adaptation (Waltham, Bell et Culshaw, 2005).

#### **V.5.1.2. Remplissage des cavités avec des matériaux solides**

Une fois les cavités identifiées, une solution consiste à les combler avec des matériaux solides (béton maigre, sable stabilisé, graviers injectés, etc.). Cela renforce la portance du sol et diminue le risque d'effondrement. Cette méthode est souvent utilisée dans les projets routiers ou urbains pour sécuriser les fondations avant construction (Gutiérrez, Parise, De Waele, & Jourde, 2014).

#### **V.5.1.3. Renforcement des structures existantes**

Dans les zones déjà bâties, il n'est pas toujours possible de déplacer les ouvrages. Il faut alors renforcer les structures en installant des micro-pieux, en consolidant les murs porteurs ou en ajoutant des poutres et appuis supplémentaires. Ces renforcements permettent de limiter les dégâts en cas de tassement ou de formation soudaine d'un vide (Gutiérrez et al., 2014).

#### **V.5.1.4. Exclusion de construction dans les zones très instables**

Lorsque les risques sont jugés trop importants, la meilleure solution est souvent de ne pas

construire. Certains terrains karstiques, avec un enchevêtrement complexe de vides et de fractures, ne peuvent être sécurisés à un coût raisonnable. Ils doivent alors être classés en zones non constructibles afin de protéger les vies humaines et les investissements (Drew & Hötzl, 1999).

## **V.5.2. Affaissement**

### **V.5.2.1. Fondations profondes (pieux ou micropieux)**

Lorsque le sol karstique est instable, des fondations profondes permettent de traverser les couches fragiles et d'ancrer la structure dans un sol plus stable. Cela évite que le bâtiment ne s'affaisse à cause de la perte de soutien sous-jacent. Cette technique est couramment utilisée en génie civil dans les zones à risque (Olivier & Gourc, 2007).

### **V.5.2.2. Injection de coulis de ciment (grouting).**

Le remplissage des cavités avec du coulis de ciment sous pression est une solution efficace pour stabiliser le terrain. Elle permet de combler les vides, de renforcer la masse du sol et de prévenir les mouvements imprévus. Cette méthode est largement utilisée avant ou pendant les travaux (T. Waltham et al., 2005b).

### **V.5.2.3. Surveillance régulière du sol avec capteurs**

Des capteurs géotechniques sont installés pour mesurer les mouvements du sol et détecter les signes précurseurs d'un affaissement. Cela permet de déclencher des actions préventives rapidement et de limiter les dégâts (BRGM, 2004).

### **V.5.2.4. Étude géotechnique préalable**

Avant tout projet de construction en zone karstique, il est indispensable de réaliser des études géotechniques approfondies. Celles-ci permettent d'identifier les zones instables et de proposer des solutions techniques adaptées, comme des fondations spécifiques ou le contournement de zones à risque (Olivier & Gourc, 2007).

### **V.5.3. Solutions aux inondations**

#### **V.5.3.1. Systèmes de drainage adaptés au karst**

Dans les zones karstiques, l'eau s'écoule de façon imprévisible à travers les fissures et les conduits souterrains. Les systèmes de drainage classiques comme les tuyaux rigides ou les caniveaux ne suffisent souvent pas. Il faut utiliser des dispositifs plus adaptés, comme des drains verticaux profonds, des puits d'infiltration, ou encore des systèmes qui ralentissent et répartissent l'écoulement pour éviter la surcharge localisée (Goldscheider & Drew, 2014).

#### **V.5.3.2. Bassins de rétention**

Pour limiter les crues soudaines liées à une forte pluie, on construit des bassins de rétention. Ces ouvrages stockent temporairement l'eau et la libèrent ensuite lentement dans les systèmes de drainage. Cela réduit le risque de débordement et protège les infrastructures situées en aval. Ces bassins sont essentiels dans les zones où l'infiltration est rapide et imprévisible, comme dans les karsts (Ford & Williams, 2007).

#### **V.5.3.3. Pompes automatiques dans les tunnels et parkings**

Dans les zones urbaines karstiques, les tunnels et les parkings souterrains sont particulièrement exposés aux infiltrations rapides. Des pompes automatiques, reliées à des capteurs de niveau d'eau, permettent d'évacuer immédiatement les infiltrations et d'éviter les dégâts matériels. Cette solution est souvent adoptée dans les projets d'aménagement urbain en terrain instable (Stevanović et al., 2015).

#### **V 5.3.4. Surélévation des bâtiments sensibles**

Certains bâtiments essentiels, comme les hôpitaux ou postes électriques, doivent être surélevés par rapport au sol naturel. Cela les protège en cas de montée d'eau rapide, notamment si l'eau surgit par une doline ou un gouffre. Cette mesure simple est souvent recommandée dans les zones où l'aléa karstique est élevé.

#### **V.5.4. Solutions à la pollution**

##### **V.5.4.1. Étanchéité renforcée des réseaux**

Dans un karst, les polluants peuvent rapidement atteindre la nappe phréatique. Il est donc impératif que les canalisations, réservoirs et systèmes d'assainissement soient parfaitement étanches. Cela permet d'éviter toute fuite ou infiltration dans le sous-sol fragile (Goldscheider & Drew, 2014).

##### **V.5.4.2. Protection des captages d'eau potable**

Les points de captage dans les karsts sont vulnérables. Il est donc essentiel de mettre en place des périmètres de protection avec des réglementations strictes pour interdire certaines activités à risque (épandage, construction, décharges). Ces zones de protection sont une barrière contre la contamination directe de l'eau potable (Drew & Hötzl, 1999).

##### **V.5.4.3. Stations de traitement adaptées**

L'eau karstique peut être fortement polluée par les nitrates, les bactéries ou les hydrocarbures. Les stations de traitement doivent donc être équipées de technologies performantes : ultrafiltration, traitement UV, réacteurs biologiques, etc. Ces traitements complexes augmentent les coûts, mais sont nécessaires dans les régions où la pollution diffuse est élevée (Stevanović et al., 2015).

##### **V.5.4.4. Interdiction de certaines activités en amont des captages**

Dans les régions karstiques, il est souvent nécessaire d'interdire certaines industries ou pratiques agricoles en amont des captages d'eau. Cela permet de limiter les sources de pollution à la source, en particulier quand l'eau souterraine circule rapidement sur de longues distances sans être filtrée naturellement.

## V .6. Les cas en Algérie

En Algérie, les phénomènes karstiques ont provoqué divers incidents géologiques et environnementaux. Voici des exemples spécifiques classés par type de risque :

### Effondrements karstiques

- À Bejaia (2016), une doline de 15 m de diamètre et 10 m de profondeur s'est formée à Melbou après des pluies intenses, liée à la dissolution des calcaires sous-jacents.
- À Cheria (Tébessa) (2009), un effondrement de plus de 100 m de diamètre a détruit une partie de la ville, causé par la rupture du toit d'une cavité dans les carbonates éocènes, aggravé par le pompage excessif des nappes.
- Près d'El Ouldja (Sétif) (2015), une tempête de neige a déclenché un effondrement de 16 m de profondeur dans des calcaires lacustres recouverts d'alluvions.
- À Boukadir (1988), un effondrement majeur a été associé à la faille de Relizane et à des variations du niveau de la nappe phréatique.



**Figure.V.13.** Effondrement karstique de la région de boukadir (chlef) en 1988(lalgerieaujourd'hui, 2022)



**Figure.V.14.** Les 2 grandes d'effondrement de la zone d'étude. A gauche : la doline d'effondrement de la RN4 (Photo prise par Pr. Mostefa GUENDOOUZ le 16/06/1988). A droite : le Bir Djeneb dans les monts carbonatés Ouarsenis

### Affaissements.

- Dans la région de M'rara (El M'Ghair), des affaissements progressifs ont fissuré des infrastructures (château d'eau, habitations) en raison de la karstification des gypses et calcaires éocènes sous des dépôts continentaux.
- La plaine de Boukadir présente des risques d'affaissement liés à la géométrie variable des carbonates recouverts de sédiments plio-quadernaires, favorisant les instabilités.

### Pollution des nappes

- Le système karstique de Ghar Boumaza (Nord-Ouest) est vulnérable aux pollutions agricoles et domestiques en raison de l'infiltration rapide des contaminants à travers les dolines et les fractures.



**Figure.V.15.** Grotte karstique de Ghar boumazaa(Ainouche, 2025)



**Figure.V.16.** Grotte karstique de Ghar boumazaa(Ainouche, 2025)

**IV.7. Conclusion**

Les milieux karstiques présentent des défis géotechniques et environnementaux majeurs pour l'aménagement du territoire. Entre les affaissements soudains, les effondrements spectaculaires, les inondations imprévisibles et la contamination rapide des nappes phréatiques, ces terrains exigent une attention particulière dès les phases de planification. Comme nous l'avons vu, les infrastructures construites en zone karstique sont exposées à des risques multiples, souvent invisibles à l'œil nu mais aux conséquences potentiellement graves.

Face à ces dangers, des solutions existent : études géotechniques approfondies, techniques de fondation spécifiques, systèmes de drainage adaptés ou encore protection renforcée des réseaux d'eau potable. Toutefois, ces mesures ont un coût important et nécessitent une surveillance constante.

Ainsi, construire en terrain karstique ne doit jamais se faire sans une connaissance fine du sous-sol. Une gestion prudente, intégrant les risques naturels, est essentielle pour garantir la sécurité des populations, la durabilité des infrastructures et la préservation des ressources en eau.

## **Conclusion générale**

L'étude approfondie des risques dans les projets d'infrastructure en zone karstique met en lumière la complexité intrinsèque et la fragilité de ces milieux géologiques particuliers, caractérisés par la dissolution progressive des roches carbonatées telles que les calcaires et dolomies. Cette dissolution, provoquée principalement par l'action de l'eau chargée en dioxyde de carbone, engendre une évolution continue et dynamique du sous-sol, créant un réseau complexe de cavités, fissures et conduits souterrains qui rendent le terrain particulièrement instable. Ces phénomènes sont le fruit de mécanismes physico-chimiques spécifiques, où la solubilité des roches, la corrosion différentielle et la cristallisation minérale interagissent avec la fracturation naturelle, modifiant sans cesse la morphologie karstique. Parallèlement, le contexte hydrogéologique joue un rôle déterminant : les circulations d'eau souterraines, souvent rapides et concentrées dans des conduits karstiques, favorisent non seulement l'érosion et l'agrandissement des cavités, mais aussi la propagation accélérée de polluants, menaçant ainsi la qualité des nappes phréatiques et la sécurité des ressources en eau potable. Ces conditions spécifiques engendrent des aléas majeurs tels que les effondrements soudains, les affaissements progressifs, les inondations imprévisibles et les contaminations environnementales, qui représentent des défis considérables pour la conception, la construction et la pérennité des infrastructures civiles. Pour répondre à ces enjeux, les méthodes de prospection géotechniques et géophysiques s'avèrent indispensables. L'utilisation combinée de techniques avancées telles que le géoradar, la tomographie électrique, la sismique réflexion et les essais de forage permet de détecter, localiser et caractériser avec une grande précision les cavités et zones de faiblesse du sous-sol. Ces outils, intégrés dans une approche pluridisciplinaire, offrent une compréhension approfondie de la structure karstique, facilitant ainsi l'évaluation des risques et l'anticipation des phénomènes d'instabilité. Cette connaissance détaillée est cruciale pour orienter les choix techniques en génie civil, notamment en adaptant les systèmes de fondation (pieux profonds, dalles rigides, injections de coulis) afin de renforcer la stabilité des ouvrages et d'éviter les dégradations liées aux tassements ou effondrements. En outre, la prise en compte du contexte hydrogéologique permet d'élaborer des stratégies efficaces de gestion des eaux souterraines, de prévention des inondations et de protection des aquifères contre les pollutions, éléments essentiels pour garantir la durabilité des infrastructures et la préservation des écosystèmes fragiles. Ainsi, la gestion des risques en zone karstique requiert une démarche proactive, intégrée et multidisciplinaire, alliant expertise géologique, hydrologique et ingénierie, ainsi qu'une

surveillance continue des paramètres environnementaux et géotechniques. Cette approche permet non seulement de réduire les coûts liés aux sinistres et aux réparations, mais aussi d'assurer la sécurité des populations et la pérennité des ouvrages. En perspective, les progrès technologiques, notamment l'intelligence artificielle appliquée à l'analyse et à l'interprétation des données géophysiques, ainsi que le développement de systèmes de monitoring en temps réel, promettent d'améliorer considérablement la prévention et la gestion des risques karstiques. Ces innovations offriront la possibilité de modéliser avec plus de précision les processus évolutifs du karst, d'anticiper les phénomènes d'instabilité et d'adapter les stratégies d'aménagement et de construction de manière plus réactive et efficace. En définitive, cette recherche met en exergue l'impératif d'une collaboration étroite entre scientifiques, ingénieurs, urbanistes et décideurs afin de concilier développement infrastructurel et protection des milieux karstiques, assurant ainsi un développement durable, résilient et respectueux des contraintes naturelles propres à ces environnements complexes et sensibles.

- Abou akar, a., & lafforgue, m. (1994). Brgm. <https://infoterre.brgm.fr/rapports/rr-39028-fr.pdf>
- Aermc c. (1982) étude des méthodes biologiques d'appréciation quantitative de la qualité des eaux. Agence de l'eau rhône méditerranée corse. [Rapport cemagref-aermc, lyon.](#)
- Apageo. (2020). Penetrometre statique. Retrieved from <https://en.apageo.com/penetrometre-statique-100kn-sur-roues-fox10>
- Bakalowicz m. (1979) contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification. Laboratoire souterrain du cnrs. Thèse de doctorat, université pierre et marie curie, paris.
- Bakalowicz m. (1992) géochimie des eaux et flux de matières dissoutes. L'approche objective du rôle du climat dans la karstogénèse. (water geochemistry and dissolved solid flux. The objective approach of climate part in the genesis of karst). Karst et évolutions climatiques. Hommage à jean nicod. Presses universitaires de bordeaux, talence: 61-74.
- Bakalowicz m. (1995) la zone d'infiltration des aquifères karstiques. Méthodes d'étude. Structure et fonctionnement. [Article scientifique](#) publié dans la revue spécialisée **hydrogéologie** (numéro 4, pages 3-21, année 1995).
- Bakalowicz m. (1996) les processus de karstification et les différents types de karst associés. Mémoires de la société géologique de france (1833) 169: 363-371.
- Bakalowicz, m. (1995). La zone d'infiltration des aquifères karstiques. Méthodes d'étude. Structure et fonctionnement. [Article scientifique](#) publié dans la revue spécialisée **hydrogéologie** (numéro 4, pages 3-21, année 1995)
- Bakalowicz, m. (1999). Connaissance et gestion des ressources en eaux souterraines dans les régions karstiques: sdage rhône méditerranée corse. Guide technique n°3. Lyon : agence de l'eau rhône méditerranée corse.
- Barres, a., & lallemand-barrès, a. (1988). Brgm. Département eau-environnement, orléans. Rapport interne, brgm
- Bebexperts. (25 mars 2019). Affaissement et fissure de la fondation. Retrieved from <https://bebexperts.com/argile-affaissement-et-fissure-de-fondation-inspection-dexpert/>
- Bögli, a., & bögli, a. (1980). Endokarst and karst hydrology. Karst hydrology and physical speleology, 73-76.

- Brgm, o. (2010). Guide méthodologique: les outils de l'hydrogéologie karstique pour la caractérisation de la structure et du fonctionnement des systèmes karstiques et l'évaluation de leur ressource. Retrieved from
- Brgm, o. (2018). Atlas morphodynamique de la côte sableuse aquitaine. Rapport final. Retrieved from
- Brgm, o. (2018). Atlas morphodynamique de la côte sableuse aquitaine. Rapport final. Retrieved from
- Brgm. (2 juillet 2018). Carotte de forage. Retrieved from <https://www.brgm.fr/fr/actualite/video/geotheque-memoire-roches>
- Camille e and grimbérieux j. (2010) éditorial: andré ozer. Bulletin de la société géographique de liège.
- Cantabria, n. (16 mai 2013). Lac brenavinto. Retrieved from <https://redcantabrarural.com/noticia-naturea/el-polje-brenavinto/>
- Casez, j. (2024). Le pont effondre. Retrieved from [nce3-regions.francetvinfo.fr/occitanie/gard/le-village-va-crever-des-commerçants-aux-revenus-amputés-après-l-effondrement-d-un-pont-dans-le-gard-2942847.htm](https://nce3-regions.francetvinfo.fr/occitanie/gard/le-village-va-crever-des-commerçants-aux-revenus-amputés-après-l-effondrement-d-un-pont-dans-le-gard-2942847.htm)
- Cerema. (6 août 2015). Forage destructif. Retrieved from [http://wikydro.developpement-durable.gouv.fr/index.php/wikigeotech:forages\\_destructifs](http://wikydro.developpement-durable.gouv.fr/index.php/wikigeotech:forages_destructifs)
- Chen z, auler as, bakalowicz m, et al. (2017) the world karst aquifer mapping project: concept, mapping procedure and map of europe. Hydrogeology journal 25: 771.
- Christophe licoppe, e. C. (17 july 2021). Flood damage in pepinster, belgium. Retrieved from <https://audiovisual.ec.europa.eu/en/reportage/p-051584>
- Clerveau m. (2016) gestion de catastrophes et évolution des vulnérabilités: retour sur les catastrophes des années 2000 en haïti. Université poitiers, école doctorale sociétés et organisations (sorg).

- Clerveau, m. (2016). Gestion de catastrophes et évolution des vulnérabilités: retour sur les catastrophes des années 2000 en haïti. Université poitiers, ecole doctorale sociétés et organisations (sorg).
- Cvijic, j. (1918). Hydrographie souterraine et évolution morphologique du karst. *Revue de géographie alpine*, 6(4), 375-426.
- Cvijik, j. (1911). *Osnove za geografiju i geologiju makedonija i stare srbije, i td. Knj. Iii*, beograd.
- Davis m. (2000) *city of quartz: los angeles, capitale du futur: la découverte la découverte & syros*.
- Donato, s. (23 decembre 2010). Affaissement. Retrieved from <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/geologie-affaissement-7649/>
- Dörfliger, n., & perrin, j. (2011). Ressources en eau: une gestion nécessairement locale dans une approche globale. *Geosciences*, 13, 94-101.
- Drew, d., & hötzl, h. (1999). Karst hydrogeology and human activities. *Impacts, consequences and implications*, 20.
- Dubois v. (2014) *l'action de l'état, produit et enjeu des rapports entre espaces sociaux. Actes de la recherche en sciences sociales 201202: 11-25*.
- Dugan, j. E., hubbard, d. M., mccrary, m. D., & pierson, m. O. (2003). The response of macrofauna communities and shorebirds to macrophyte wrack subsidies on exposed sandy beaches of southern california. *Estuarine, coastal and shelf science*, 58, 25-40.
- E. Husson, j. P., (m. Beltramo, a. Vallet). (2010). Effondrement à saint-pryvé-saint-mesmin en 2010 (45) - cliché ddt45. Retrieved from [https://orisk-bfc.fr/sites/default/files/pole-karst/documents/jet/4erdkarst/noury\\_4erdkv\\_aleamvkarst\\_13122023.pdf](https://orisk-bfc.fr/sites/default/files/pole-karst/documents/jet/4erdkarst/noury_4erdkv_aleamvkarst_13122023.pdf)
- Ek c, schyns j-c and ozer a. (2006) *le karst*. 2-87401209-2.
- El-hakim, m., & chauvin, p. (2004). Orofacial granulomatosis presenting as persistent lip swelling: review of 6 new cases. *Journal of oral and maxillofacial surgery*, 62(9), 1114-1117.
- Falcone, f., lopetegi, t., laso, m., baena, j., bonache, j., beruete, m., . . . Sorolla, m. (2004). Babinet principle applied to the design of metasurfaces and metamaterials. *Physical review letters*, 93(19), 197401.

- Fanuel, g. (2011). Potentiel et recherches spéléologiques dans les bassins du bocq et du samson. Atlas du karst wallon, 88.
- Fondasol. (mars 2015). Forage carotte. Retrieved from <https://www.groupefondasol.com/fr/le-mag/du-geotechnique-sondage-carott>
- Ford d and williams pd. (2007) karst hydrogeology and geomorphology: john wiley & sons.
- Ford, d., & williams, p. D. (2007). Karst hydrogeology and geomorphology: john wiley & sons.
- Fovet, t., thomas, p., & amad, a. (2015). Psychiatrie en milieu pénitentiaire: une sémiologie à part? Paper presented at the annales médico-psychologiques, revue psychiatrique.
- France, a. O. (25 janvier 2021). Affaissement. Retrieved from <https://www.ouest-france.fr/environnement/l-affaissement-des-sols-pourrait-menacer-635-millions-de-personnes-dans-le-monde-d-ici-2040-7108445>
- Füchtbauer e, reininghaus j and jockusch h. (1988) developmental control of the excitability of muscle: transplantation experiments on a myotonic mouse mutant. Proceedings of the national academy of sciences 85: 3880-3884.
- Genna, a., & capdeville, j. P. (2007). Réorganisations hydrographiques du minervois, exemples de la cesse et du ruisseau du saint-michel (hérault, france) au quaternaire, conséquences géologiques. Quaternaire. Revue de l'association française pour l'étude du quaternaire, 18(3), 271-282.
- Geoforum. (21 juin 2023). Diaclases. Retrieved from <https://www.geoforum.fr/topic/52411-diaclases/>
- Geopat. (mai 2010). Sismique refraction. Retrieved from <https://geopat.pro/sismique-refraction/>
- Geosec. (2018). Affaissement. Retrieved from <https://www.geosec.fr/copyright/>
- Gexplore. (14 decembre 2016). Forage. Retrieved from [https://www.gexplore.fr/fr/exploration\\_minerale/services-de-terrain/debris-roches-forage-destructif/](https://www.gexplore.fr/fr/exploration_minerale/services-de-terrain/debris-roches-forage-destructif/)

- Gillard, m. (11 septembre 2021). Futura. Retrieved from <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/geologie-faille-1065/>
- Gilli e. (1986) les grandes cavités souterraines, études et applications. *Karstologia* 7: 2-10.
- Gilli e. (2011) karstologie: karsts, grottes et sources: dunod.
- Gilli, e. (1999). Rupture de spéléothèmes par fluage d'un remplissage endokarstique. L'exemple de la grotte de ribière (bouches-du-rhône). *Comptes rendus de l'académie des sciences-series iia-earth and planetary science*, 329(11), 807-813.
- Gilli, é. (2015). *Karstology: karsts, caves and springs: elements of fundamental and applied karstology*: crc press.
- Goldscheider, n., & drew, d. (2014). *Methods in karst hydrogeology: iah: international contributions to hydrogeology*, 26: crc press.
- Goldscheider, n., & drew, d. (2014). *Methods in karst hydrogeology: iah: international contributions to hydrogeology*, 26: crc press.
- Gourc, j.-p., & stoltz, g. (2007). Influence traitement et compressibilité déchet sur conductivité fluide. Paper presented at the cfm 2007-18ème congrès français de mécanique.
- Gutiérrez, f., parise, m., de waele, j., & jourde, h. (2014). A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst. *Earth-science reviews*, 138, 61-88.
- Hartia, n. (21 juillet 2021). Kinkempois tunnel. Retrieved from [https://commons.wikimedia.org/wiki/file:july\\_2021\\_floods\\_in\\_li%c3%a8ge.20.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/file:july_2021_floods_in_li%c3%a8ge.20.jpg)
- Husson e, auxenfans t, herbaut m, et al. (2018) sequential and simultaneous strategies for biorefining of wheat straw using room temperature ionic liquids, xylanases and cellulases. *Bioresource technology* 251: 280-287.
- Lankston, r. W. (1990). High-resolution refraction seismic data acquisition and interpretation geotechnical an environmental geophysics: volume i: review and tutorial (pp. 45-74): society of exploration geophysicists.

- Lenoble, a., & martinaud, m. (2003). Apports du pénétrromètre à la connaissance d'un site préhistorique. Le cas de l'abri de diepkloof, province du cap, afrique du sud. *Archeosciences, revue d'archéométrie*, 27(1), 27-36.
- Llopis lladó n. (1970) fundamentos de hidrogeologia carstica: introduccion a la goespeleología.
- Mangin a. (1994) karst hydrogeology. *Groundwater ecology* 1: 43.
- Mangin, a. (1975). Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Université de dijon.
- Maréchal, j.-c., estupina, v. B., caballero, y., cernesson, f., fleury, p., allemand, m. J., . . . Malaterre, p.-o. (2012). Projet gestion multi-usages de l'hydrosystème karstique du lez-simulations numériques de différents scénarios de changements globaux. Brgm (bureau de recherches géologiques et minières)(bureau de recherches ....
- Margat, j., & torrent, h. (1992). Brgm.
- Mihevc, a. (2007). The age of karst relief in west slovenia. *Acta carsologica*, 36(1).
- Milanovic p. (2004) water resources engineering in karst: crc press.
- Milanović, p. (2018). Engineering karstology of dams and reservoirs: crc press.
- Miller, h., & henriet, j.-p. (1990). Marine geophysik. *Berichte zur polarforschung*(57), 36-39.
- Mischler, p., lheureux, s., dumoulin, f., menu, p., sene, o., hopquin, j.-p., . . . Faloya, v. (2009). Huit fermes de grande culture engagées en production intégrée réduisent les pesticides sans baisse de marge. *Le courrier de l'environnement de l'inra*, 57(57), 73-91.
- Naughton, o., mccormack, t., drew, d., gill, l., johnston, p., morrissey, p., & regan, s. (2018). The hydrogeology of the gort lowlands. *Irish journal of earth sciences*, 36(1), 25-44.
- Nicod, j. (1972). Pays et paysages du calcaire: fenixx.
- Nicod, j. (1991a). Du nouveau sur la fontaine de vaucluse et son karst. Paper presented at the annales de géographie.
- Nicod, j. (1991b). Karstologie théorique et appliquée en roumanie theoretical and applied karstology, vol. 3, 1987. *Karstologia*, 17(1), 58-59.

- Niering, m., holzwarth, r., reichert, j., pokasov, p., udem, t., weitz, m., . . . Abgrall, m. (2000). Measurement of the hydrogen 1 s-2 s transition frequency by phase coherent comparison with a microwave cesium fountain clock. *Physical review letters*, 84(24), 5496.
- Noury, g., vedie, e., clement, f., husson, e., respaud, c., azemard, p., . . . Perrin, j. (2020). Aléa mouvements de terrain liés au karst: contextes, méthode et cas type traités en vue d'un guide. Paper presented at the jngg 2020-journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur.
- Noury, g., vedie, e., clement, f., husson, e., respaud, c., azemard, p., . . . Perrin, j. (2020). Aléa mouvements de terrain liés au karst: contextes, méthode et cas type traités en vue d'un guide. Paper presented at the jngg 2020-journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur.
- Olivier, f., & gourc, j.-p. (2007). Hydro-mechanical behavior of municipal solid waste subject to leachate recirculation in a large-scale compression reactor cell. *Waste management*, 27(1), 44-58.
- Ozer a, pagano jm and lis jt. (2014) new technologies provide quantum changes in the scale, speed, and success of selex methods and aptamer characterization. *Molecular therapy nucleic acids* 3.
- Parise, m., & lollino, p. (2011). A preliminary analysis of failure mechanisms in karst and man-made underground caves in southern italy. *Geomorphology*, 134(1-2), 132-143.
- Parise, m., pisano, l., & vennari, c. (2018). Sinkhole clusters after heavy rainstorms. *Journal of cave and karst studies*, 80(1), 28-38.
- Perrin, j., noury, g., & cartannaz, c. (2014). Aléa-karst: vers une approche multicritère de l'aléa lié aux cavités karstiques en contexte calcaire. Volume 1: trame méthodologique-rapport brgm. Retrieved from
- Plume-webmag. (2019). Effondrement karstique. Retrieved from <https://www.ma-plume-webmag.com/fr/decouvertes/fenetre-sur/9-le-phenomene-karstique-geologie>

- Poiraud, a., bernardie, s., defive, e., bitri, a., & grandjean, g. (2008). Premiers résultats sur le glissement hérité du monastier-sur-gazeille (massif central, france): rapport final brgm/rp-56679-fr.
- Salvi, m. (1979). Contribution à l'étude des manifestations neurologiques du maléate de perhexiline (à propos de six observations).
- Samyn, k., mathieu, f., bitri, a., nachbaur, a., & closset, l. (2014). Integrated geophysical approach in assessing karst presence and sinkhole susceptibility along flood-protection dykes of the loire river, orléans, france. *Engineering geology*, 183, 170-184.
- Solsolution. (2023). Pénétrromètre dynamique retrieved from <https://www.sol-solution.com/produits/materiels-geotechniques/grizzly/>
- Stevanović, s., draper, l. M., langhan, m. M., campbell, t. E., kwong, m. L., wunderlich, j. R., . . . Kammula, u. S. (2015). Complete regression of metastatic cervical cancer after treatment with human papillomavirus–targeted tumor-infiltrating t cells. *Journal of clinical oncology*, 33(14), 1543-1550.
- Unit.eu. (avril 2012). Principe des mesures sismiques. Retrieved from [http://ressources.unit.eu/cours/rmdi/rmdi4/co/grain3\\_2\\_6.html](http://ressources.unit.eu/cours/rmdi/rmdi4/co/grain3_2_6.html)
- Waltham, d. (2015). Milankovitch period uncertainties and their impact on cyclostratigraphy. *Journal of sedimentary research*, 85(8), 990-998.
- Waltham, t., bell, f. G., & culshaw, m. G. (2005a). Rock failure under imposed load over caves. *Sinkholes and subsidence: karst and cavernous rocks in engineering and construction*, 141-156.
- Waltham, t., bell, f. G., & culshaw, m. G. (2005b). *Sinkholes and subsidence: karst and cavernous rocks in engineering and construction: springer science & business media*.
- White, w. B., dey, h. M., & schulman, p. (1989). Assessment of the daily blood pressure load as a determinant of cardiac function in patients with mild-to-moderate hypertension. *American heart journal*, 118(4), 782-795.



## **Résumé**

Ce mémoire traite des risques liés aux projets d'infrastructures en zone karstique. La première partie présente la définition géologique du karst, un paysage formé par la dissolution de roches solubles comme le calcaire, avec des formes caractéristiques telles que les dolines, gouffres et grottes, ainsi que les différents types de karst (actifs, fossiles, couverts). Il explique aussi la méthodologie pour étudier l'évolution de l'aléa karstique. Ensuite, le texte analyse l'origine des problèmes, notamment la solubilité des roches par l'eau acide, la fissuration qui favorise l'infiltration, et les mécanismes physico-chimiques responsables de la formation du karst, comme l'érosion chimique et les effondrements. On y décrit également le contexte hydrogéologique, en insistant sur la circulation complexe des eaux souterraines et les risques d'inondation liés à l'engorgement des conduits karstiques. Une autre partie présente les méthodes de prospection géotechnique et géophysique, telles que le carottage, la tomographie électrique et le radar géologique, utilisées pour détecter les cavités et évaluer la stabilité des sols. Enfin, le mémoire expose les conséquences pour le génie civil, notamment les affaissements, effondrements, inondations et la pollution des nappes phréatiques, illustrés par des exemples concrets. Il propose également des solutions techniques comme le renforcement des sols par injections, le drainage contrôlé et la surveillance par capteurs. En conclusion, ce travail montre que les zones karstiques nécessitent une approche pluridisciplinaire et des techniques adaptées pour limiter les risques, bien que cela implique des coûts importants.

## **Abstract**

This thesis addresses the risks associated with infrastructure projects in karst areas. The first part presents the geological definition of karst, a landscape formed by the dissolution of soluble rocks such as limestone, with characteristic features like sinkholes, shafts, and caves, as well as the different types of karst (active, fossil, covered). It also explains the methodology used to study the evolution of karst hazards. Next, the text analyzes the origin of the problems, particularly the solubility of rocks in acidic water, the presence of fractures that promote infiltration, and the physical and chemical processes responsible for the formation of karst, such as chemical erosion and collapses. It also describes the hydrogeological context, highlighting the complex flow of underground water and the flood risks linked to the clogging of karst conduits. Another section presents the geotechnical and geophysical investigation methods, such as drilling, electrical tomography, and ground-penetrating radar, used to detect cavities and assess soil stability. Finally, the thesis outlines the consequences for civil engineering, including subsidence, collapses, flooding, and groundwater pollution, illustrated by concrete examples. It also proposes technical solutions such as soil reinforcement by injection, controlled drainage, and monitoring using sensors. In conclusion, this work shows that karst areas require a multidisciplinary approach and adapted techniques to reduce risks, even though this involves significant costs.