

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

CONTRIBUTION GÉOMATHÉMATIQUE À LA RÉOLUTION  
DE PROBLÈMES D'ÉTAT DE STABILITÉ DE LA MINE SEDREN À HAÏTI

THÈSE PRÉSENTÉE  
COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DU DOCTORAT EN SCIENCES  
DE LA TERRE ET DE L'ATMOSPHÈRE

PAR  
NELSON VALENTINO

AOÛT 2022

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL  
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.04-2020). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»



## REMERCIEMENTS

La réalisation de cette thèse a été rendue possible grâce à l'appui de l'Université du Québec à Montréal (UQÀM), des professeurs du département de Génie de la Construction (CTN) de l'École de Technologie Supérieure (ÉTS); des firmes Géninov Inc., Société minière Mazarin Inc., Eurasian Mining Inc., Marien Mining Compagny S.A., Chimitec Ltée et Sodemine S.A.; du Bureau des Mines et de l'Énergie (BME) d'Haïti, du Laboratoire National du Bâtiment et des Travaux Publics (LNBTP) d'Haïti.

De prime abord, j'exprime ma gratitude aux professeurs Alfred Jaouich, Daniel Perraton, Alan Carter, mes codirecteurs de recherche pour l'expression de leur enthousiasme, de leur professionnalisme et de leur disponibilité vis-à-vis de moi. Je profite aussi de cette note pour adresser une requête spéciale à l'endroit de Jean William Colas (géologue senior), Samuel Pierre (ing., Ph. D.), Yves Marthone (ing.), André Lerebours (M. ing.), Suzie Chérestal (M. Éducation), Jean Hervé Noël (dessinateur) et Marc-Sony Laurensaint (ing.), Fritz Varice Jr. (aide-assistant) pour leur soutien.

Mes séjours en Haïti (2015-2020) dans le cadre de mes recherches ont été profitables. Néanmoins, je tiens à remercier pour leur dévouement : Yves-Fritz Joseph (ing., ex-directeur général / LNBTP), Claude Prépetit (ing., directeur général / BME), St-Louis Mildor (ing., directeur du département de la géologie / BME), Louis Honoré Pierre (ing., consultant interne / BME), Sophia Ulysse (ing., chargée de projets / BME), Moïse St-Éloi (technicien / BME) et Dominique Boisson (Ph. D., contributeur / BME).

J'exprime surtout ma reconnaissance pour l'accord des droits d'auteur réservés (échantillons et documents d'archives) qu'ils ont concédés à l'UQÀM aux fins de cette recherche scientifique et technique.



## DÉDICACES

À ma mère P-Mathilde Pierre-Antoine.

À ma tante Maryse Narcisse-Merveille.

À mes frères bien-aimés John, Alan et Manel.

À mon fils Dimitri.

À mes deux filles  
Taïna-Mathilde, et Mathilde.

À France Bernard de la Ville de Montréal  
Qui m'a donné le goût de la simulation.

A Li Li & Pierre Montès  
de la Polytechnique de Montréal  
Qui m'ont alimenté du peu d'essence  
nécessaire dans mes lampes trépassées.



## TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS .....	iii
DÉDICACE.....	v
LISTE DES FIGURES .....	xi
LISTE DES TABLEAUX.....	xv
LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES .....	xvii
LISTE DES SYMBOLES ET DES UNITÉS .....	xix
RÉSUMÉ.....	xxi
INTRODUCTION GÉNÉRALE .....	1
PREMIÈRE PARTIE REVUE DE LA LITTÉRATURE .....	7
CHAPITRE 1 PROBLÉMATIQUE DE SYSTÈMES MINIERS SOUTERRAINS .....	9
1.1 Tenseur de contraintes dans les massifs rocheux .....	9
1.1.1 Évaluation des contraintes gravitationnelles dues au poids mort des terres.....	10
1.1.2 Évaluation des contraintes vives dues aux perturbations.....	11
1.1.3 Évaluation des contraintes principales.....	18
1.2 Synthèse des risques environnementaux .....	20
1.3 Comportement différedes ouvrages souterrains .....	22
1.3.1 Investigations expérimentales au laboratoire.....	26
1.3.2 Investigations expérimentales in situ .....	30
1.4 Phénomène des terrains confinés .....	30
1.4.1 Mécanismes d'instabilités et de déformabilité d'une cavité souterraine .....	31
1.4.2 Critères de stabilité structurale des terrains confinés.....	34
1.5 Causes des facteurs aggravants .....	35
1.6 Comportement différedes ouvrages souterrains .....	37
1.6.1 Connaissances du rôle de confinement du soutènement des galeries .....	37
1.6.2 Connaissances de l'équilibre terrain-soutènement .....	37
1.6.3 Connaissances de procédés de soutènements du massif rocheux .....	39
1.6.4 Connaissances du concept de déplacement critique d'un tunnel .....	43
1.7 Synthèse .....	45

CHAPITRE 2	CONTEXTES DE L'ÉTUDE DE CAS DE SEDREN	46
2.1	La zone d'étude : le domaine des Caraïbes	46
2.2	La région d'étude : la presqu'île d'Haïti	49
2.2.1	Topographie de la presqu'île d'Haïti	50
2.2.2	Géologie, morphologie et pétrologie de la presqu'île d'Haïti	51
2.3	La région d'étude : la presqu'île d'Haïti	54
2.3.1	Géologie, morphologie et pétrologie de la presqu'île d'Haïti	54
2.3.2	Les anomalies du massif rocheux de Terre Neuve	58
2.3.3	Les gisements de Mémé et Cassés du massif de Terre Neuve	58
2.4	Pétrologie des roches encaissantes	60
2.5	Les ressources minérales de la mine Sedren	63
2.6	Conclusion	69
CHAPITRE 3	SYNTHÈSE D'IDENTIFICATION DE MODÈLES RHÉOLOGIQUES EXISTANTS	73
3.1	Représentation mathématique de modèles rhéologiques	74
3.2	Typologie de modèles rhéologiques	78
3.3	Revue des fonctions de charge des lois rhéologiques	85
3.4	Synthèse des critères de modèles de collocation	90
3.5	Discussions & conclusion	95
DEUXIÈME PARTIE	SYSTÉMATISATION DU PROBLÈME GÉOMÉCANIQUE	101
CHAPITRE 4	ÉTUDE DU GÉOSYSTÈME DE SEDREN	105
4.1	Caractérisation géomécanique du massif rocheux de Sedren	105
4.1.1	Caractérisation par des méthodes traditionnelles	107
4.1.2	Caractérisation par analyse d'images	108
4.2	Représentation mathématique de modèles rhéologiques	108
4.3	Typologie de modèles rhéologiques	110
4.4	Revue des fonctions de charge des lois rhéologiques	112
4.5	Synthèse des critères de modèles de collocation	112
4.5.1	Représentation mathématique : Fonction de transfert du système en boucle ouverte (FTBO)	114
4.5.2	Représentation mathématique : Fonction de transfert du système en boucle fermée (FTBF)	114
4.6	Validité du système minier souterrain	115
4.7	Conclusion	116

TROISIÈME PARTIE MODÉLISATION RHÉOLOGIQUE & ANALYSE MODALE DU SYSTÈME .....	117
CHAPITRE 5 DÉVELOPPEMENT D'UN MODÈLE GÉOMÉCANIQUE.....	119
5.1 Sélection de méthodes pertinentes .....	119
5.1.1 Méthode énergétique Euler-Lagrange .....	120
5.1.2 Méthode d'analyse harmonique de Fourier.....	123
5.1.3 Méthode rhéologique simple de Newton .....	126
5.2 Sélection de l'option pertinente .....	128
5.3 Développement d'un modèle hybride contributif .....	132
5.4 Étude de déformation du modèle d'étude développé .....	133
5.5 Conclusion .....	138
CHAPITRE 6 ANALYSE STRUCTURALE DU SYSTÈME GÉOMÉCANIQUE .....	141
6.1 Le code de description du modèle de variables d'état .....	141
6.2 Résolution du modèle numérique ciblé .....	142
6.3 Présentation de solutions variantes.....	152
6.3.1 L'approche transitoire moderne .....	152
6.3.2 L'approche fréquentielle classique .....	154
6.4 Réponses indicielles adéquates .....	156
6.5 Validité des résultats .....	157
6.6 Conclusion .....	157
QUATRIÈME PARTIE SIMULATION NUMÉRIQUE DU MODÈLE.....	159
CHAPITRE 7 ÉTUDE DE CAS : LA MINE SEDREN .....	161
7.1 Étude de chargement des galeries de l'infrastructure .....	161
7.2 Vérification de la structure du modèle.....	170
7.3 Méthodologie de simulation du modèle proposé .....	176
7.4 Analyse des résultats de déformations par les critères de design structural .....	177
7.5 Analyse de sensibilité des paramètres du modèle chargé .....	183
7.6 Validité des résultats .....	188
7.7 Conclusion .....	188

CHAPITRE 8 ANALYSE DES RÉSULTATS DE DÉFORMATION DES GALERIES ÉTUDIÉES .....	191
8.1 L'approche adoptée .....	191
8.2 Présentation des résultats de fluage .....	194
8.3 Analyse de déformations par la méthode de convergence-confinement .....	196
8.4 Validité des résultats .....	198
8.5 Conclusion .....	201
CONCLUSION GÉNÉRALE .....	203
ANNEXE A CARTE MORPHOLOGIQUE DE LA RÉPUBLIQUE D'HAÏTI.....	207
ANNEXE B ILLUSTRATION DU CADRE ENVIRONNEMENTAL D'HAÏTI .....	211
ANNEXE C CADRE DE DÉTECTION DES DÉFAILLANCES SOUTERRAINES & DES ACTIVITÉS DE RECONNAISSANCE .....	215
ANNEXE D SYNTHÈSE DES TRAVAUX DE PROSPECTION PAR SURVEILLANCE VIBRATOIRE .....	217
ANNEXE E ÉVALUATION DES CONTRAINTES DE CONFINEMENT .....	305
ANNEXE F ANALYSE DES ANNEAUX DES TUNNELS SOUS DES CONTRAINTES NATURELLES & INDUITES .....	305
ANNEXE G SENSIBILITÉ DES PARAMÈTRES VISCOÉLASTIQUES .....	343
ANNEXE H FAMILIARISATION AVEC LA THÉORIE SUR LA MAILLAGE DES MÉTHODES DES DIFFÉRENCES FINIES (FDD) .....	348
ANNEXE I SÉLECTION DE CODES ADÉQUATS .....	355
RÉFÉRENCES .....	355

## LISTE DES FIGURES

Figure	Page
0.1 Impacts des perturbations sur un système minier souterrain .....	2
0.2 Détails de procédé de prédiction d'état de stabilité .....	4
1.1 Triaxialité des contraintes normales et de cisaillement .....	11
1.2 Diagramme de corps libre (DCL) des charges combinées .....	16
1.3 Évaluation de contraintes maximale ( $\sigma_1$ ) et minimale ( $\sigma_3$ ) .....	19
1.4 Phénomènes de dégradation de l'anneau en béton armé des galeries souterraines.....	21
1.5 Exemples types de modèles simulables et valides.....	23
1.6 Courbes contraintes de fluage et de relaxation .....	27
1.7 Concept de la courbe limite du déviateur équivalent versus la déformation du matériau .....	29
1.8 Diagramme d'évolution de la résistance en compression simple versus la vitesse de déformation.....	30
1.9 Concepts d'instabilités structurales et contraignables.....	31
1.10 De la blocométrie jusqu'à la rupture.....	32
1.11 Comportement du massif rocheux autour d'une excavation .....	33
1.12 Mécanisme de gonflement.....	35
1.13 Mécanisme de dégradation .....	36
1.14 Résumé du principe de la méthode convergence-confinement .....	38
1.15 Courbes caractéristiques de convergences de modèles de déformation différée de massif rocheux .....	39
1.16 Soutènement porteur de galeries souterraines .....	41
1.17 Soutènement armant et confinant de galeries souterraines.....	42
1.18 Élongation pour différentes valeurs de résistance d'un massif rocheux .....	43
1.19 Concept de déplacement critique d'un tunnel.....	44
2.1 Situation d'Haïti dans les Caraïbes.....	46
2.2 Morphologie de la zone des Caraïbes .....	48

2.3	Localisation des principales failles géologiques de l'île Hispaniola .....	49
2.4	Topographie régionale de la presqu'île d'Haïti .....	50
2.5	Localisation des minéraux du site / Terre Neuve / Haïti .....	52
2.6	Coupe géologique à travers la partie SE de la presqu'île du Nord-Ouest et la partie NW du massif du Nord .....	53
2.7	Carte des principales unités morphologiques de l'île d'Hispaniola .....	55
2.8	Les gisements de Mémé et Casséus du massif de Terre Neuve / Haïti .....	59
2.9	Phases de minéralisation d'un modèle skarn de type et autres minéraux de la mine Sedren .....	62
2.10	Superficie des gisements et des réserves de minerais de Terre Neuve .....	64
2.11	Indices de minéralisations couvrant la presqu'île septentrionale .....	65
2.12	Coupe géologique d'une partie de la galerie Mémé .....	66
2.13	Coupe géologique E-O 2D couvrant le secteur Casséus illustrant la concentration d'or sous du marbre .....	67
2.14	Coupe géologique E-O 3D de réserves couvrant le secteur Casséus .....	68
2.15	Illustration des résultats d'analyse d'échantillons prélevés dans le secteur de Casséus.	71
3.1	Courbe viscoplastique de compression vs la déformation uniaxiale .....	74
3.2	Représentation mathématique de fluage et de relaxation du modèle de Burgers et ses composantes viscoélastiques équivalentes .....	82
3.3	Courbes de comportement viscoplastique des macros-molécules orientées .....	84
3.4	Schéma des différentes zones d'endommagement autour de la cavité du massif rocheux .....	88
3.5	Domaine des surfaces de charge à différentes étapes de fluage .....	90
3.6	Frontières des surfaces et des contraintes dans le plan p-q pour les contraintes du modèle viscoplastique .....	92
3.7	Caractéristiques générales d'une déformation de modèles viscoélastiques.....	96
4.1	Système géotechnique contraignable .....	102
4.2	Méthodologie de systématisation de l'instabilité de Sedren .....	103
4.3	Coupe géologique illustrant les lignes entrecoupées de la structure géologique .....	110
4.4	Schéma-bloc de système asservi, multivariable, réel de Sedren .....	113
4.5	Schéma-bloc de système asservi, couplé .....	113

4.6	Schéma-bloc de système asservi, perturbé, observable avec retour d'état .....	119
5.1	Méthodologie de modélisation du système géomécanique de Sedren.....	117
5.2	Définition du problème selon la méthode énergétique de Euler-Lagrange .....	120
5.3	Éléments finis de quadrilatères à nœuds et conditions aux limites du modèle .....	122
5.4	Schéma du modèle non-linéaire proposé à 4 corps.....	123
5.5	Concept de sollicitations continues du principe de Boltzmann .....	126
5.6	Généralisation du modèle spatio-temporel ciblé .....	127
5.7	Diagramme de corps libre (DCL) du modèle ciblé.....	133
5.8	L'ellipse définissant la zone d'influence autour de l'excavation .....	135
5.9	L'ellipse autour de l'excavation a pour axes 2 p et 2 q .....	136
5.10	Développement du modèle rhéologique ciblé .....	140
6.1	Schéma-bloc du système géomécanique à variables d'état .....	143
6.2	Schéma-bloc de système asservi avec dérivées à la source .....	147
6.3	Spectres de réponses variantes fréquentielles / SRF.....	163
6.4	Spectres de réponses variantes fréquentielles / SRF.....	153
6.5	Réponses variantes transitoires / Cas non amorti ( $\zeta < 1$ ), mode 2 .....	154
6.6	Réponses variantes transitoires / Cas non amorti ( $\zeta < 1$ ), mode 3 .....	155
6.7	Réponses variantes transitoires / Cas amorti ( $\zeta > 1$ ), mode 3.....	155
6.8	Réponse transitoire adéquate de l'état de mobilité .....	156
6.9	Script Simulink adéquat dans l'espace d'état de mobilité à un échelon de perturbation .....	157
7.1	Schéma logique et fonctionnel d'analyse de stabilité .....	160
7.2	Identification des contraintes induites in situ sur la carte mondiale des contraintes. ....	162
7.3	Diagramme de corps libre (DCL) des contraintes agissant au nœud reliant voûte et parement .....	164
7.4	Diagrammes des contraintes normales du tunnel selon les spécifications standards de JSCE .....	166
7.5	Diagrammes des contraintes de cisaillement du tunnel selon les spécifications standards de JSCE.....	168
7.6	Analyse de la résistance du massif rocheux des galeries Mémé-Casséus .....	175
7.7	Perspective du modèle limité.....	177

7.8	Sensibilité aux déformations / Influence de $K$ .....	178
7.9	Sensibilité aux déformations / Influence de la taille des cavités .....	179
7.10	Sensibilité aux perturbations initiales / Influence de $p$ .....	180
7.11	Sensibilité aux perturbations initiales / Influence de $q$ .....	180
7.12	Sensibilité aux perturbations initiales / Influence de $\tau_{xy}$ .....	181
7.13	Sensibilité aux perturbations initiales / Influence de $u_{total}$ .....	181
7.14	Analyse des zones endommagées après 50 ans autour des cavités.....	184
7.15	Analyse du processus d'endommagement durant l'excavation .....	186
7.16	Analyse du processus d'endommagement post excavation .....	187
7.17	Variation de contraintes à la périphérie de la voûte du tunnel aux différentes valeurs de $K$ .....	189
7.18	Contraintes à la périphérie du parement du tunnel aux différentes valeurs de $K$ .....	190
8.1	Profil de déplacement longitudinal (PDL) dans un milieu viscoélastique du modèle linéaire (4 éléments / liquide ) de Burgers .....	193
8.2	Courbes expérimentales de fluage d'échantillons de roches basaltiques à la galerie Casséus de la mine Sedren .....	194
8.3	Courbes de contrainte radiale versus distance radiale .....	196
8.4	Courbes de contrainte tangentielle versus distance radiale .....	197
8.5	Courbes de confinement du massif rocheux en fonction du déplacement.....	197
8.6	Représentation du Profil des Déformations Longitudinales (PDL) du modèle développé dans un milieu élasto-viscoplastique.....	199
8.7	Sensibilités de la voûte et du parement du tunnel de l'adit de Mémé .....	200
8.8	La tendance des contraintes radiales et tangentielles.....	202

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Page
1.1 Spécifications standards pour le calcul d'efforts axiaux et de moments fléchissants de l'enrobage d'un tunnel .....	17
1.2 Mécanismes responsables de l'effondrement d'une galerie souterraine .....	25
1.3 Classement de la pression nécessaire pour provoquer la rupture de quelques roches par compression uniaxiale .....	40
2.1 Origine de l'archipel des Caraïbes .....	47
2.2 Log chronostatigraphique du massif rocheux de Terre Neuve .....	57
2.3 Indices d'altération des roches de la région de Terre Neuve .....	61
2.4 Données géométriques recueillies du site .....	70
2.5 Échantillons prélevés dans le secteur Casséus .....	79
3.1 Modèles empiriques dépendant du temps .....	76
3.2 Nomenclature des phénomènes dépendant du temps .....	77
3.3 Les briques de base pour les modèles de matériau .....	78
3.4 Étude phénoménologique des modèles rhéologiques viscoélastiques .....	80
3.5 Étude phénoménologique des modèles rhéologiques viscoplastiques .....	85
3.6 Revue des taux de déformations différées des modèles de lois rhéologiques .....	89
3.7 Revue des fonctions de charge des lois rhéologiques .....	94
3.9 Caractéristiques du modèle CVISC .....	99
4.1 Caractérisation par des méthodes traditionnelles .....	107
4.2 Levés géophysiques hélicoptérés de systèmes métallogéniques des galeries Mémé-Casséus de la région Sedren .....	111
4.3 Concept de système asservi, multivariable couplé, FTBO versus celui de système asservi, perturbé, observable avec retour d'état, FTBF .....	113
4.4 Analyse dimensionnelle des variables d'état de stabilité des galeries minières .....	115
5.1 Concept d'essais de fluage de matériau solide .....	124
5.2 Étude de faisabilité d'un problème de modèle géomathématique .....	129

5.3	Comparaison par paires de critères de décision.....	130
5.4	Matrice multicritère de décision .....	130
5.5	Matrice d'aléas de risques.....	131
5.6	Degrés d'importance des activités .....	132
5.7	Étapes de développement du modèle utilisé et validé .....	147
6.1	Paramètres viscoélastiques et viscoplastiques pour l'analyse de fluage .....	145
6.2	Relations entre les modules et les déformations .....	146
6.3	Analyse des paramètres combinés de la matrice de la fonction de transfert.....	149
7.1	Données utilisées pour l'élaboration du modèle proposé de Sedren .....	161
7.2	Rigidités des sections du tunnel.....	164
7.3	Évaluation des charges pressiométriques de gravité et de cisaillement.....	165
7.4	Évaluation des charges de sismicité.....	167
7.5	Diagrammes d'efforts axiaux et de moments fléchissants des tunnels.....	169
7.6	Spécifications standards des paramètres géomécaniques .....	170
7.7	Évaluation de la pression de soutènement selon Terzaghi .....	171
7.8	Caractérisation du massif rocheux .....	173
7.9	Guide pour l'estimation du facteur d'endommagement D .....	174
7.10	Modèle de prédiction choisi d'évaluation des contraintes dans le secteur de Terre Neuve.....	176
7.11	Prédiction du confinement .....	182
7.12	Récapitulatif des paramètres et des calculs effectués .....	183
7.13	Prédiction du niveau des contraintes dans le tunnel en D.....	185
8.1	Comparaison des modèles de 3 versus 4 éléments .....	192

## LISTE DES ABRÉVIATIONS, DES SIGLES ET DES ACRONYMES

AFTES	Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain
ASTM	American Society for Testing & Materials
BME	Bureau des Mines et de l'Énergie d'Haïti
CCM	Méthode de convergence-confinement
CNESST	Commission des Normes, de l'Équité, de Santé, de Sécurité du Travail
CTN	Département du génie de la Construction
CVISC	Modèle élasto-viscoplastique développé utilisé dans FLAC
DCL	Diagramme Corps Libre
DED	Diagramme des efforts gravitationnels
DEQ	Diagramme des efforts sismiques
DET	Diagramme des efforts tranchants
DEV	Diagramme des efforts de cisaillement
DIDACTU	Dictatitiel scientifique et technique d'évaluation des tunnels
ÉTS	École de Technologie Supérieure affiliée au réseau de l'Université du Québec
EXAMINE <sub>2D</sub>	Code de modélisation et de simulation technique utilisé surtout en excavation
FDM	Méthode de différences finies avec FLAC <sub>2D</sub>
FEM	Méthode d'éléments finis avec PLAXIS <sub>2D</sub>
FLAC <sub>2D</sub>	Code de simulation technique dérivé de Fast Lagrangian Analysis of Continua
FRF	Fonction de réponse en fréquence
FRP	Fonction de réponse en phase
FTBF	Fonctions de Transfert à Boucle Fermée
FTBO	Fonctions de Transfert à Boucle Ouverte
GÉNINOV	Nom de la firme de génie-conseils (partie prenante)
GSI	Geological strength index
H-B	Critère de design structural Hoek-Brown
IHSI	Institut Haïtien de la Statistique et d'Informatique

IRSM	Commission sur la compression des roches dans les tunnels
IRSST	Institut de Recherches en Santé et Sécurité au Travail
JSCE	Japan Society of Civil Engineering
LDP	Profil de déplacement longitudinal
LNBTTP	Laboratoire National du Bâtiment et des Travaux Publics
MatLab	Code de langage scientifique dérivé de Laboratoire de Mathématiques
M-C	Critère de design structural Mohr-Coulomb
PLAXIS <sub>2D</sub>	Code de modélisation et de simulation technique utilisé en excavation
RocLab	Code technique dérivé de Laboratoire de mécanique des Roches
RMR	Indice de classification d'un massif rocheux
SODEMINE	Nom de la firme de génie-conseils (partie prenante)
SCTA	Département des Sciences de la Terre et de l'atmosphère
TBM	Bouclier mécanisé à confinement de sol et de massif rocheux utilisé pour excaver un tunnel (Tunnel Boring Machine)
UQÀM	Université du Québec à Montréal.

## LISTE DES SYMBOLES ET DES UNITÉS

$\alpha$	[MPa]	Perturbation ondulatoire gravitationnelle
$\beta$	[MPa]	Perturbation ondulatoire de cisaillement
$\delta$	[m]	Déplacement relatif
$\epsilon$ (ou $\epsilon_{ij}$ )	[mm/mm]	Tenseur déformation $\epsilon_{ij} = \sigma / E \epsilon_{ij} = e_i e_j = a_1 b_1 + a_2 b_2 + a_3 b_3$
$\epsilon(t)$	[mm/mm]	Déformation (matériau élasto - viscoplastique) $\epsilon(t) = \sigma * f(t)$
$\epsilon_v$	[mm <sup>3</sup> /mm <sup>3</sup> ]	Déformation volumique $\epsilon_v = J_1 + J_2 + J_3$
$\epsilon_{cr}$ , $\epsilon_{cr}$	[%]	Déformation critique
$\epsilon^e$ , $\epsilon^e$	[%]	Déformation élastique
$\epsilon^v$ , $\epsilon^v$	[%]	Déformation visqueuse
$\epsilon^p$ , $\epsilon^p$	[%]	Déformation plastique
$\phi$	[rad]	Angle de phasage
$\gamma$	[t/m <sup>3</sup> ];[%]	Masse volumique; Déformabilité relative
$\eta$	[MPa-an]	Module de viscosité
$\varphi$	[rad]	Angle de phase
$\varphi'$		Angle de frottement
$\Lambda$		Coefficient de Lamé
$\lambda$	[m]	Longueur d'onde
$\mu$	[MPa]	Rigidité ou Module de cisaillement
$\nu$		Coefficient de Poisson
$\Pi$		Symbole de produit algébrique
$\theta$	[rad]	Angle de phase initiale; Angle de pente
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Densité absolue
$\sigma$ (ou $\sigma_{ij}$ )	[MPa]	Tenseur des contraintes totales $\sigma = F / A = E * \epsilon$
$\sigma'$ (ou $\sigma'_{ij}$ )	[MPa]	Tenseur des contraintes effectives. $\sigma' (ou \sigma'_{ij}) = \sigma (ou \sigma_{ij}) - u . I$
$\sigma(t)$	[MPa]	Contrainte (matériau élasto / viscoplastique) $\sigma(t) = E * f(t)$
$\sigma_c$	[MPa]	Résistance en compression uniaxiale
$\sigma_t$	[MPa]	Résistance en tension uniaxiale

$\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$ [MPa]	Contraintes radiale, orthoradiale et longitudinale en axisymétrie
$\sigma_{c\ m}$ [MPa]	Résistance en compression uniaxiale du massif
$\sigma_1$ [MPa]	Contrainte principale maximale positive en compression
$\sigma_2$ [MPa]	Contrainte principale intermédiaire positive en compression
$\sigma_3$ [MPa]	Contrainte principale minimale positive en compression
$\sigma'_3$ [MPa]	Contrainte de confinement
$\sigma'_{3\ max}$ [MPa]	Contrainte de confinement maximale
$\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$	Contraintes dans les axes du repère cartésien (O, x, y, z)
$\tau$ [MPa]	Contrainte de cisaillement sur une facette donnée
$\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$	Contraintes de cisaillement dans les plans (xy), (xz) et (yz)
$\tau_{r\theta}, \tau_{rz}, \tau_{\theta z}$	Contraintes de cisaillement dans les plans (r $\theta$ ), (rz) et ( $\theta z$ )
$\zeta$	Facteur d'amortissement
$\omega$	Paramètre d'endommagement
$\varpi$ [cycle/s]	Vitesse angulaire
$\varpi_n$ [rad]	Fréquence naturelle d'amortissement

## RÉSUMÉ

Une discipline, issue des sciences et des techniques minérales, étudie depuis 80 ans *la mécanique des roches*. Elle est scientifiquement appelée : « *la géomécanique* »; elle permet entre autres de prévoir les déformations différées de cavités souterraines provoquées par des contraintes de confinement avant, pendant et après creusement d'un massif rocheux. Les mesures in situ réalisées ont montré que l'évolution du comportement différé des galeries minières est considérable puisque les connaissances actuelles n'ont attribué ce phénomène qu'à la rhéologie du matériau.

De ce fait, la thèse vise l'étude des anomalies de déformation des zones d'influence dans les galeries minières soumises à des contraintes naturelles et induites. La modélisation rhéologique contributive de l'amplification du phénomène de rupture permet de définir deux paramètres spatio-temporels : l'instabilité et la déformabilité du site. Les simulations numériques (éléments finis et différences finies) renforcées avec la méthode d'analyse modale de variables d'état et exécutées avec les codes de calculs Roclab, Didactu, Matlab, EXAMINE<sub>2D</sub>, PLAXIS<sub>2D</sub> et FLAC<sub>2D</sub> qualifient et quantifient ces deux paramètres réponses.

Les cas d'instabilités par écrouissement structural ou par rupture globale dues à l'excès de contraintes naturelles et induites (perturbations) sont traités à l'étude de cas d'instabilité de galeries de la mine Sedren dans un porphyre auro-cuprifère d'Haïti. Et, l'apport d'un nouveau modèle élasto-viscoplastique, comme outil de design aidant à optimiser la durabilité des ouvrages miniers, éliminera à la source les dangers fréquents dans le secteur minier. L'applicabilité de ce modèle spatio-temporel sur un ouvrage réel s'effectue avec la confrontation des résultats de calculs analytiques, numériques versus des mesures in situ réalisées dans les galeries Mémé et Casséus de la mine Sedren situées dans la région de Terre Neuve à Haïti.

Mots clés :

Site minier, massif rocheux, système géomécanique, zone d'influence, contraintes de confinement, état de stabilité, galerie minière, cavité souterraine, risques géomécaniques, perturbations, sismicité, vibrations structurales, comportement différé, modèle d'état, déformation viscoélastique, déformation viscoplastique, modélisation rhéologique, analyse modale, simulation numérique, éléments finis, différences finies, Sedren, mines Mémé et Casséus, Terre Neuve / Haïti, Roclab, Didactu, Matlab, EXAMINE<sub>2D</sub>, PLAXIS<sub>2D</sub> et FLAC<sub>2D</sub>.



## INTRODUCTION GÉNÉRALE

Des centaines d'accidents parfois mortels surviennent chaque année dans les mines à la grandeur du monde à cause des instabilités au pourtour des excavations souterraines. Ces instabilités lentes ou parfois violentes se produisent suite à des ruptures progressives de massifs rocheux. Autrement dit, ce sont : « *Des changements de champ de contraintes résultant de vibrations dues à des activités d'excavation, de tectonique, ajoutés au confinement (poids mort, gradients de chaleur, pression interne ...), qui provoquent l'instabilité et / ou la déformabilité d'une mine existante* » (Harcouët, 2005 et Corbeau, 2015). Et ce, « *tout au long de sa vie utile* » (Purwodihardjo, 2004; Paraskevopoulou C. et Diederichs M., 2013). De ce fait, la conception de cavités souterraines requiert souvent d'établir de quelle façon le massif rocheux sera excavé puisque « *la technique choisie dépendra de deux facteurs : l'état du massif rocheux<sup>1</sup> et les matériaux de soutènement* » (Terzaghi et Voigt, 1979). Or, une galerie minière est une infrastructure d'une très grande importance étant donné que sa mise en valeur dépend de sa fonction (transport, production), du contexte géologique du secteur environnant et de sa durée de vie. Conséquemment, selon Barton (2000), « *l'infrastructure doit être en mesure d'interagir au poids des terres, aux contraintes de cisaillement, et de plus contrebalancer les perturbations environnementales* ».

Des états de contraintes naturelles et induites sont souvent localisés avant et après creusement à l'intérieur de la zone d'influence<sup>2</sup> d'une galerie minière ou tunnel (Figure 0.1). En Haïti, des séismes perturbent fréquemment le paysage<sup>3</sup> (Dolan et Wald, 1998) et McCann 2006). De ce fait, le cas de confinement<sup>4</sup> de certaines infrastructures minières existe. D'où une telle problématique aux mines<sup>5</sup>.

---

<sup>1</sup> Voir Annexe A pour des détails sur la « Carte géologique de la presqu'île d'Haïti ».

<sup>2</sup> Zone d'influence (stress zone) : Région située autour d'une excavation souterraine et dans laquelle les contraintes sont supérieures à ce qu'elles étaient avant le creusement de l'excavation.

<sup>3</sup> Voir Annexe C pour des détails sur le « Cadre de défaillances de cavités souterraines par surveillance vibratoire ».

<sup>4</sup> Confinement : Application d'une pression sur les parois d'un tunnel, par le biais d'un soutènement principalement, dans le but de limiter les convergences et le déconfinement du terrain.

<sup>5</sup> Voir Annexe B pour des détails sur « l'Illustration du cadre environnemental d'Haïti ».

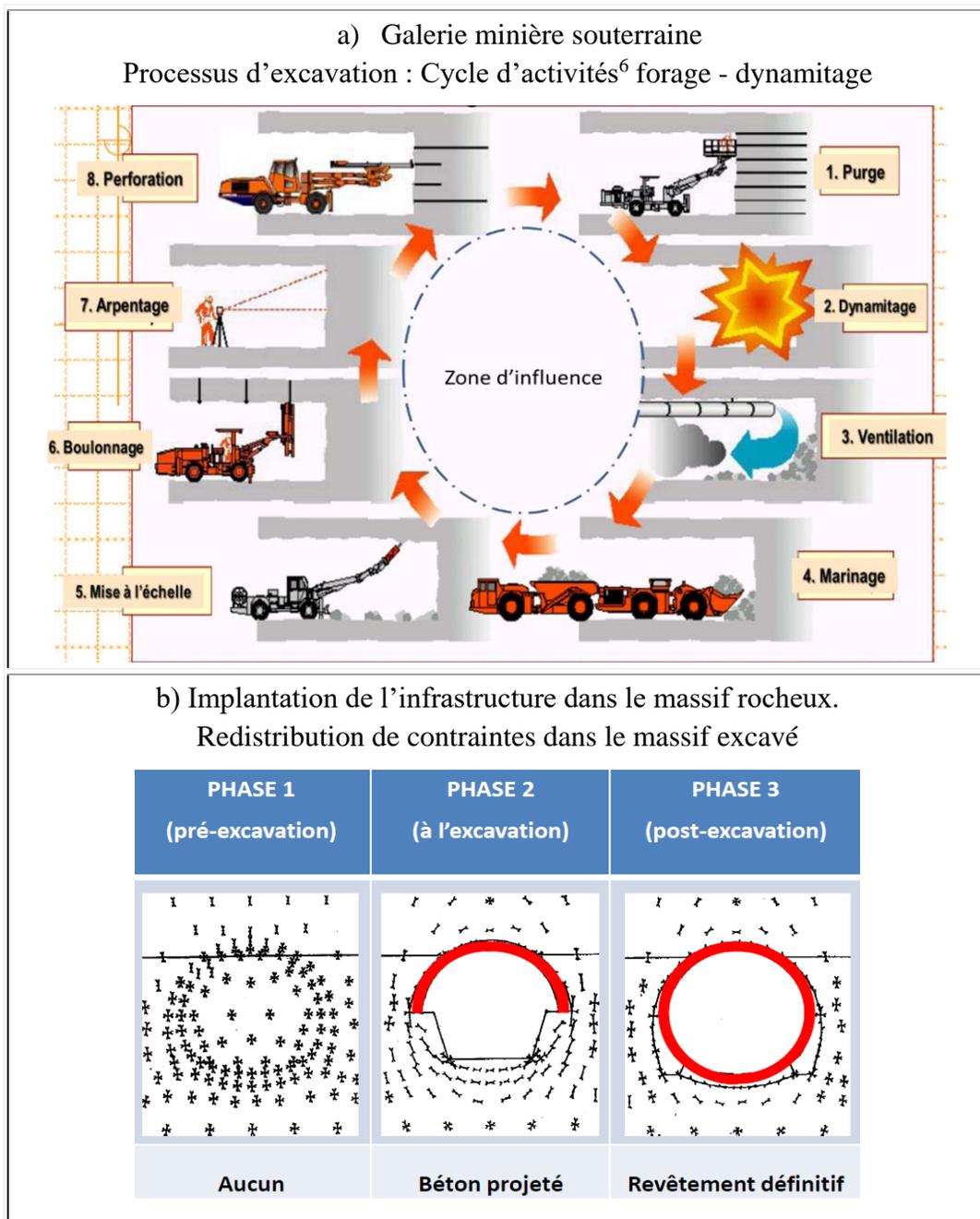


Figure 0.1 : Impacts des perturbations sur un système minier souterrain – L'ellipse dessinée en ligne tiretée bleue en (a) circonscrit la zone d'influence – Le cercle (anneau) dessiné en rouge en (b) illustre le revêtement (Zienkiewicz, 2000).

<sup>6</sup> Terminologie de certaines activités types :

- (1). Purge: opération délicate qui consiste à faire tomber de la voûte (toit de la cavité) et du front les blocs et les écailles non stables.
- (4). Marinage: évacuation des marins (déblais formés par l'excavation d'un pas d'avancement) issus de l'excavation .

Entre autres de : a) déformations du front de taille des galeries; b) déconfinement de cavités souterraines; c) effondrement de l'infrastructure vétuste (Fine, 1998). De ce fait, le but de la recherche est : « De qualifier et de quantifier les différents facteurs contrôlant le développement des zones d'influence des galeries de la mine Sedren à Haïti ».

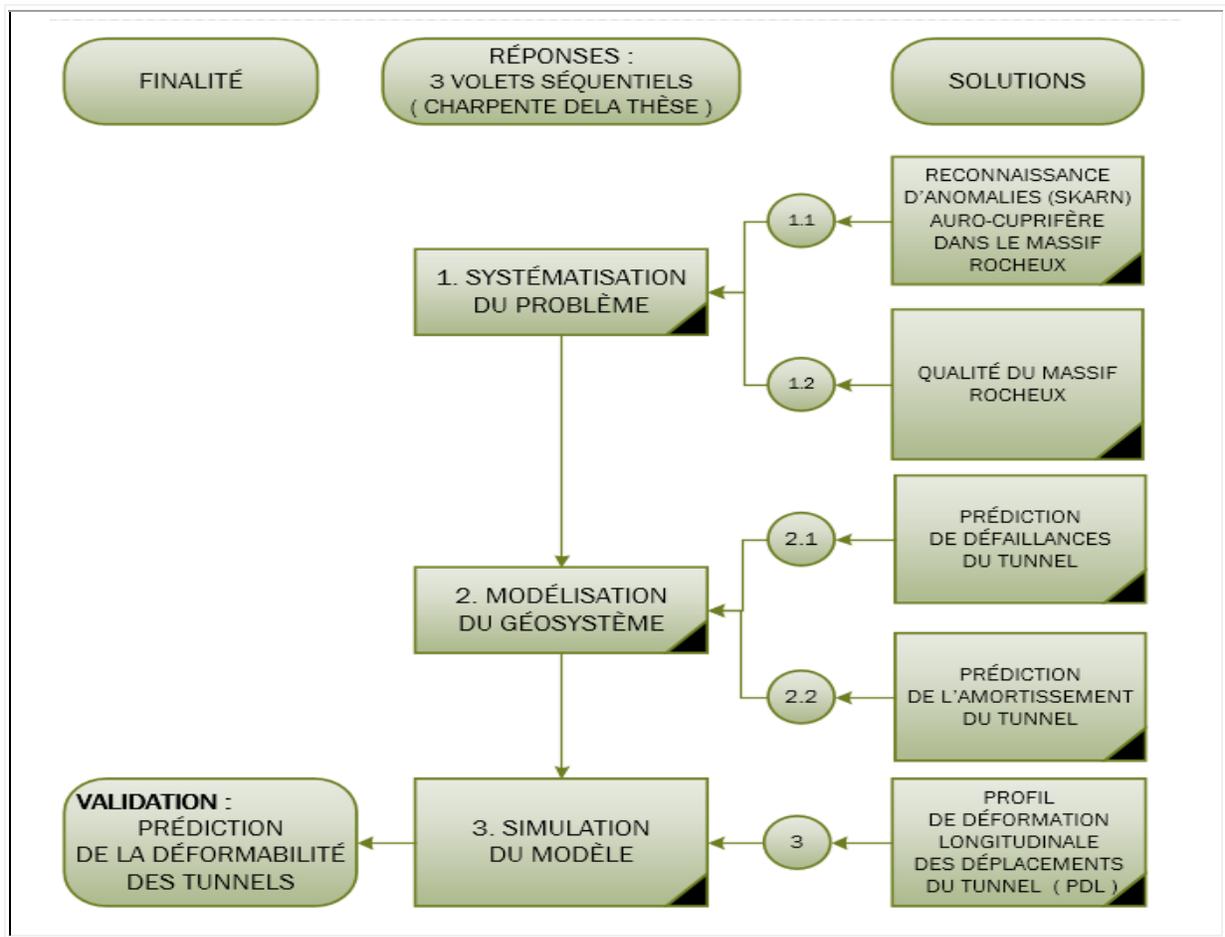
La thèse s'intitule : « Contribution géomathématique à la résolution de problèmes d'état de stabilité de la mine Sedren à Haïti ». Elle fait suite à un cas observé de systèmes souterrains de la presqu'île d'Haïti, la mine Sedren du massif rocheux de Terre Neuve soumis au fluage, à la relaxation, à la fatigue, à la vétusté et à la non-réhabilitation.

L'objectif global est : « D'étudier la pétrogenèse des zones de confinement des galeries souterraines soumises aux contraintes naturelles et induites (perturbations) et prévoir les déformations différées de ces cavités avant, pendant et après excavation du massif rocheux ».

Spécifiquement, il s'agit de : a) Systématiser le problème en tenant compte de certaines interactions. b) Développer un modèle rhéologique de prédiction de la mobilité et de la déformabilité de la roche confinée tenant compte de son comportement différé puis statuer sur l'état de stabilité des galeries souterraines endommagées. c) Déterminer la zone d'influence de l'excavation et analyser le phénomène de fluage pour aboutir à une méthodologie permettant de prendre en compte les implications dans le calcul à long terme des revêtements de tunnels en Haïti .

Il est à remarquer : la Figure 0.2 synthétise le procédé de prédiction de l'état de stabilité du massif rocheux confiné. Trois volets séquentiels (la systématisation du problème, la modélisation du système et la simulation du modèle développé) correspondant aux trois dernières des quatre parties distinctes de la thèse constituent la charpente. Au cumulatif : dix chapitres constituent la thèse, incluant l'INTRODUCTION GÉNÉRALE et la CONCLUSION GÉNÉRALE.

- La première partie (regroupant les chapitres 1 à 3) collige nos connaissances. De prime abord, le problème géotechnique est identifié par une étude bibliographique sur « *le comportement rhéologique des déformations différées des massifs rocheux en terrain poussant (squeezing rock) avant et après creusement des galeries* » (Purwodihardjo, 2004). L'état des lieux est exposé. Et par la suite, une synthèse d'identification de modèles rhéologiques est présentée.



Script Visio, 2022

Figure 0.2 : Détails de procédé de prédiction d'état de stabilité - Le site <sup>7</sup> à l'étude est «un massif rocheux, confronté à un accroissement d'instabilités et de déformations dû au poids mort des terres» (Barton, 2000); des agents de dégradation amplifiés par l'excavation et/ou la tectonique. Cette amplification est la conséquence des effets de l'activité humaine.

- La deuxième partie (référant au chapitre 4) décrit le système géotechnique réel. De prime abord, on tente de mettre en relation les différentes lois de comportement avec les phénomènes physiques qui sont à l'origine des faits observés sur les ouvrages souterrains. « Mécaniquement, l'état d'équilibre d'une cavité souterraine subit des instabilités et se déforme au cours de sa vie utile » (Paraskevopoulou et Diederichs, 2013).

---

<sup>7</sup> Voir Annexes A et B pour des détails sur « La morphologie et les cadres contextuels d'Haïti ».

Pour répondre à cette problématique d'étude, une analyse dimensionnelle des variables d'état est nécessaire pour pouvoir de prime abord systématiser le problème dans son ensemble (Akhrif, 2017). Bref, la systématisation du problème consiste à définir l'évolution d'un système physico-chimique global et le réduire d'un système physiquement simple et adéquat.

- La troisième partie (regroupant les chapitres 5 et 6) présente les résultats de l'étude expérimentale. Les différents essais effectués ont servi de support pour la détermination des paramètres de la loi viscoplastique (Lemaître, J. et Chaboche, J. L., 1988). Systématiquement, un nouveau modèle comme contribution géomathématique est développé selon une approche moderne basée sur le modèle d'état. Ce modèle de type viscoplastique à contrôle automatique fait l'objet d'analyse modale et est exécuté avec le code Matlab. Bref, il s'agit de la modélisation du système. La modélisation est l'art de la simplification qui nous permet de prévoir le comportement de ce qui est trop complexe pour être appréhendé globalement de façon simple. Lors de l'excavation, le système est confronté inévitablement au cycle forage-dynamitage (Zienkiewicz, 2000). Après l'excavation, il aura à réagir aux perturbations environnementales précitées voire aux fortes contraintes dues aux ondes sismiques locales <sup>8</sup> (Corbeau, 2015). De plus, des phénomènes vibratoires et destructeurs (forage-dynamitage, sismicité, etc.), des effets d'actions anthropiques auront l'influence directe sur la durée de vie du système. Ces phénomènes peuvent produire des préjudices considérables à la stabilité des ouvrages en cours du creusement ou lors de leur exploitation. Dans le cas de cette thèse, une modélisation d'état de stabilité s'avère nécessaire, où l'observabilité voire l'asservissement vu sous l'angle géomécanique ne sera pas négligée (Ostertag, 2006 et Akhrif, 2017). Elle consistera à développer un modèle adéquat; tenant compte des impacts environnementaux et de «*l'évolution du système métallogénique* » (Harcouët, 2005).

- La quatrième ou dernière partie (regroupant le chapitre 7 et 8) simule numériquement le modèle contributif spatio-temporel. Les données collectées du cas observé (la mine Sedren à Haïti) sont traitées, analysées de façon systémique, validées de façon optimale, simulées par éléments finis (FEM) avec PLAXIS<sub>2D</sub> et validées par différences finies (FDM) avec FLAC<sub>2D</sub>.

---

<sup>8</sup> Voir Annexe C pour des détails sur le « Cadre de défaillances de cavités souterraines ».

L'applicabilité de la loi de Lemaître (modèle CVISC<sup>9</sup>) à l'échelle de l'ouvrage est démontrée et l'objectivité de l'extrapolation de cette loi à long terme est alors discutée. Bref, la simulation numérique est proposée à l'aide des codes RocLab, Didactu, MatLab, EXAMINE<sub>2D</sub>, PLAXIS<sub>2D</sub> et FLAC<sub>2D</sub> aux fins d'obtenir des réponses de réceptances (déplacements, déformations, zone d'influence) valides.

---

<sup>9</sup> La loi de Lemaître démontre que le modèle CVISC (Nishihara, 2015) est l'extension de celui de Burgers qui obéit au comportement viscoélastique. L'ajout d'un patin en série au modèle de Burgers fait de sorte que le modèle CVISC est de nature viscoplastique. Voir les Tableaux 4.4 et 4.5.

## **PREMIÈRE PARTIE**

### **REVUE DE LITTÉRATURE**

Cette première partie de la thèse expose une revue de la littérature... De quoi s'agit-il ? En quelques mots, il s'agit d'une synthèse de différentes méthodes et approches existantes de modélisation géomécaniques applicables à l'étude de la stabilité de galeries de mine dans un porphyre auro-cuprifère d'Haïti. Cette première partie de la thèse regroupe les Chapitres 1 à 3 inclusivement. Le Chapitre 1 permet la mise en contexte de la problématique des systèmes miniers souterrains. Notamment, les mécanismes d'instabilité sont exposés. Par ailleurs, il est clairement mis en évidence toute la problématique inhérente aux déformations différées qu'il convient de modéliser pour une analyse réaliste de stabilité pour ce type d'ouvrage. Le Chapitre 2 apporte une réflexion étayée et importante du contexte particulier dans lequel l'étude de cas des gisements des galeries Mémé et Casséus se dessine. L'ensemble des éléments pertinents en lien avec la géographie, la géologie et la minéralogie du territoire en cause sont clairement exposé. Ce chapitre apporte des éclaircissements significatifs quant à l'environnement complexe dans lequel les galeries des gisements à l'étude sont soumises. Le Chapitre 3 discute des différents modèles rhéologiques à partir desquels la modélisation sera élaborée. Cette revue met en contexte les perspectives de la recherche et dresse l'état d'avancement de l'art.



# CHAPITRE 1

## PROBLÉMATIQUE DE DE SYSTÈMES MINIERS SOUTERRAINS

Les systèmes miniers souterrains n'ont pas tous la pérennité escomptée. D'une part, ils se déforment prématurément sous leur propre poids ( $D$ ) puisqu'ils sont conçus pour une courte durée de vie utile. D'autre part, « *ils s'effondrent si l'état du massif rocheux et les matériaux de soutènement ne sont pas adaptés aux conditions rigoureuses de leur environnement* » (Barla, 2001). Vu sous l'angle géomécanique, le phénomène à la base de cette problématique, appelé terrain poussant (squeezing rock) dans les galeries minières, est le noeud de notre sujet. D'une part, la déformation d'un massif rocheux peut se produire par fluage (de la translation ou de la rotation) sous les effets de contraintes externes ( $\sigma_D$ ,  $\sigma_v$ ,  $\sigma_Q$ ) du voilement ou de l'effondrement. D'autre part, sous les effets de contraintes internes ou pression de confinement ( $p$ ), la déformation d'un massif rocheux peut produire de la distorsion (plissement) ou du déplacement (glissement, faille). D'où la notion d'élongation linéaire ( $\epsilon$ ) et/ou de déformation angulaire ( $\gamma$ ), paramètres de réponses importants dans la recherche de solutions à notre problème.

Le site à l'étude, la mine Sedren n'y échappe pas à cette transformation (élongation linéaire ( $\epsilon$ ) ou/ou de déformation angulaire ( $\gamma$ )). Préalablement à la détermination d'un plan d'action visant à gérer les risques géologiques et environnementaux dans des galeries, il est nécessaire de se donner un cadre théorique de référence qui nous sert de guide en vue d'une telle intervention. De ce fait, des problématiques de systèmes miniers souterrains sont dressées dans ce chapitre.

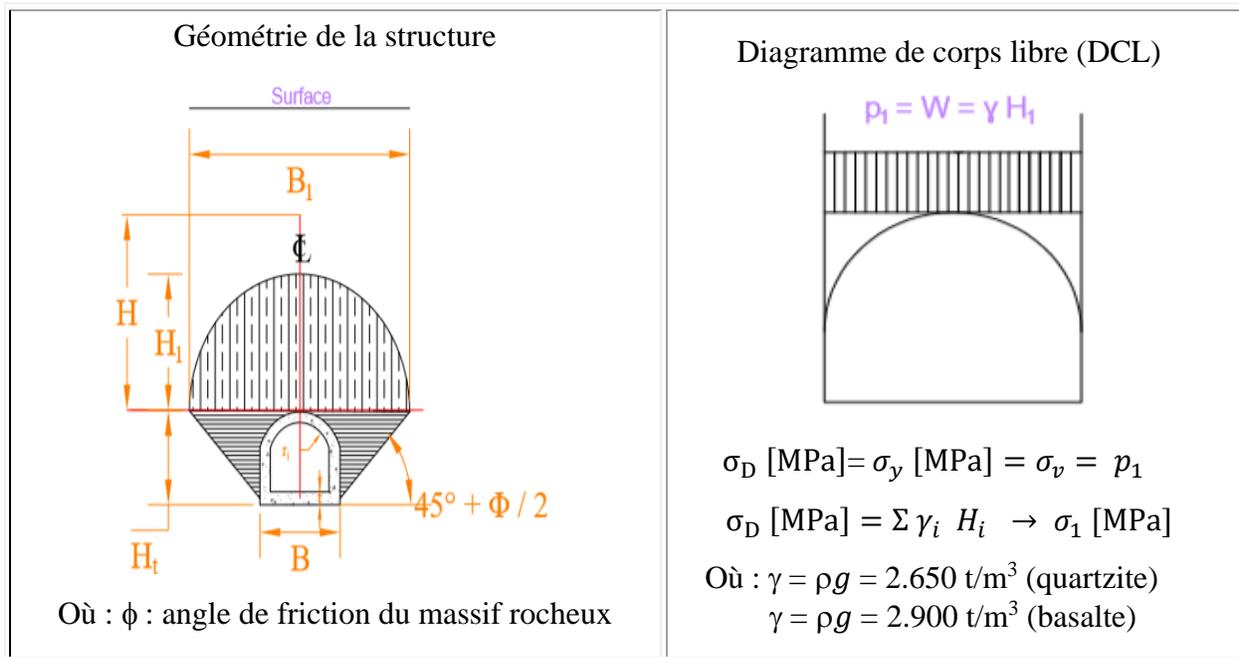
### 1.1 Tenseur de contraintes dans les massifs rocheux

Un élément essentiel requis dans la prédiction des instabilités est l'état des contraintes qui prévaut dans un massif rocheux avant que les excavations ne soient réalisées. La connaissance des contraintes naturelles et induites est nécessaire pour le suivi du comportement des ouvrages. En effet, leurs grandeurs et leurs orientations affectent entre autres :

- b) Les excavations souterraines (Zienkiewicz, 2000).
- c) Le forage et le sautage (Amadei et Stephansson, 1997).
- a) La stabilité des massifs rocheux (Barton, 2000).

### 1.1.1 Évaluation des contraintes gravitationnelles dues au poids mort des terres ( $\sigma_D$ )

« Une part des contraintes in situ dans les massifs rocheux est due aux poids des terres et donc à la profondeur » (Hammoum, 2017). « Les premières hypothèses communément adoptées pour l'établissement du tenseur de contraintes in situ dans les massifs rocheux font que la contrainte principale majeure soit verticale » (Hoek et Brown, 1978). Donc, elle ne serait influencée que par la profondeur et la masse volumique. Néanmoins, cette affirmation implique que les contraintes principales soient provoquées par des forces nécessaires « pour empêcher le mouvement horizontal dû à la déformation latérale d'un milieu élastique semi-infini soumis à une force verticale » (Brown, 2008). Les mesures de contraintes effectuées par certains chercheurs contredisent cette affirmation et démontrent que parfois, la contrainte principale majeure peut être horizontale. Cette observation, confirmée par des mesures sur de nombreux sites, permet d'affirmer que a priori, « le tenseur de contraintes ne peut être déterminé que par la mesure de la profondeur de l'infrastructure » (Heidbach, 2008). Voir détails de l'adit<sup>10</sup> principal de la mine Sedren à la Encadré 1.1.



Encadré 1.1 : Méthode d'évaluation des contraintes gravitationnelles ( $\sigma_D$ )

<sup>10</sup> Adit ou galerie d'accès principal : Voie de pénétration partant du jour, horizontale ou à peu près. Elle remplit, pour un étage de la mine, les mêmes fonctions qu'un puits.

### 1.1.2 Évaluation des contraintes vives <sup>11</sup> dues aux perturbations ( $\sigma_{(v+Q)}$ ), ( $\tau_{(v+Q)}$ )

Le poids des terres est une des composantes des contraintes, mais n'est pas l'unique source.

C'est pour cela, l'établissement d'un tenseur de contraintes du site à l'étude est important.

$$\text{Tenseur de contraintes} = \sigma = \sigma_{ij} = \Sigma(\sigma_{ij} e_i e_j)$$

Où :

$$\text{Tenseur de contraintes} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

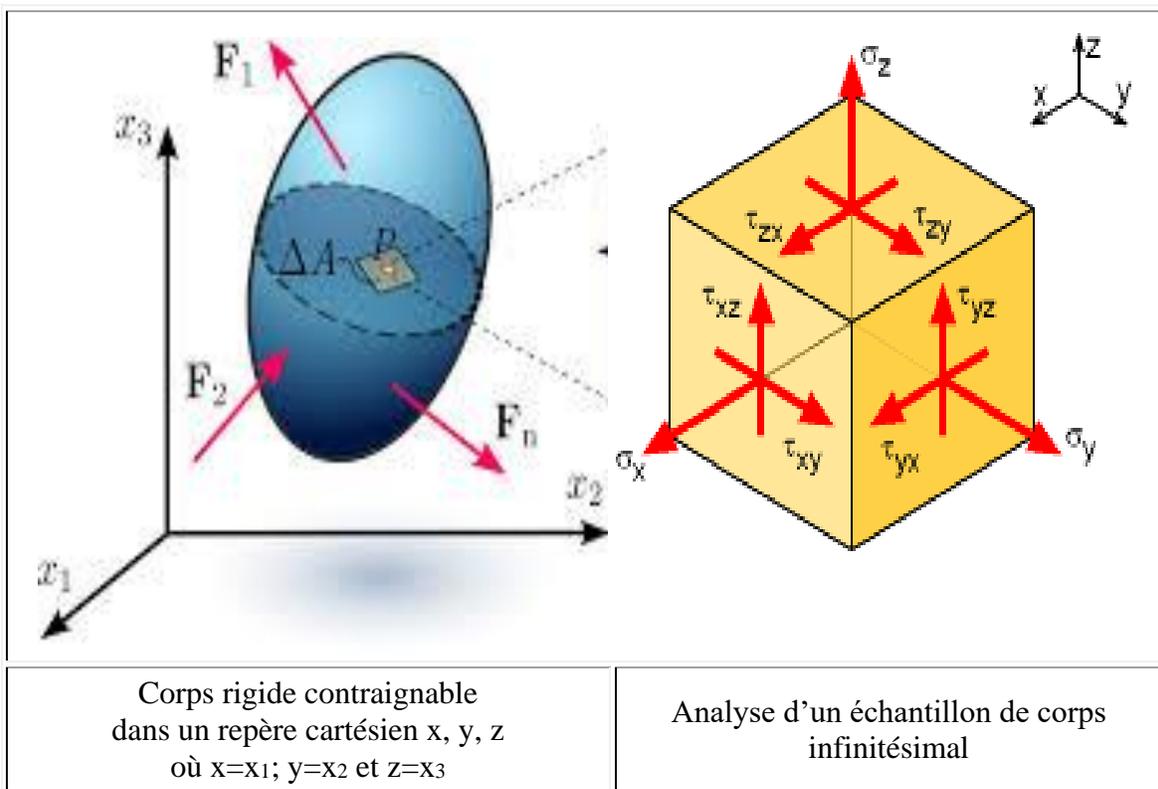
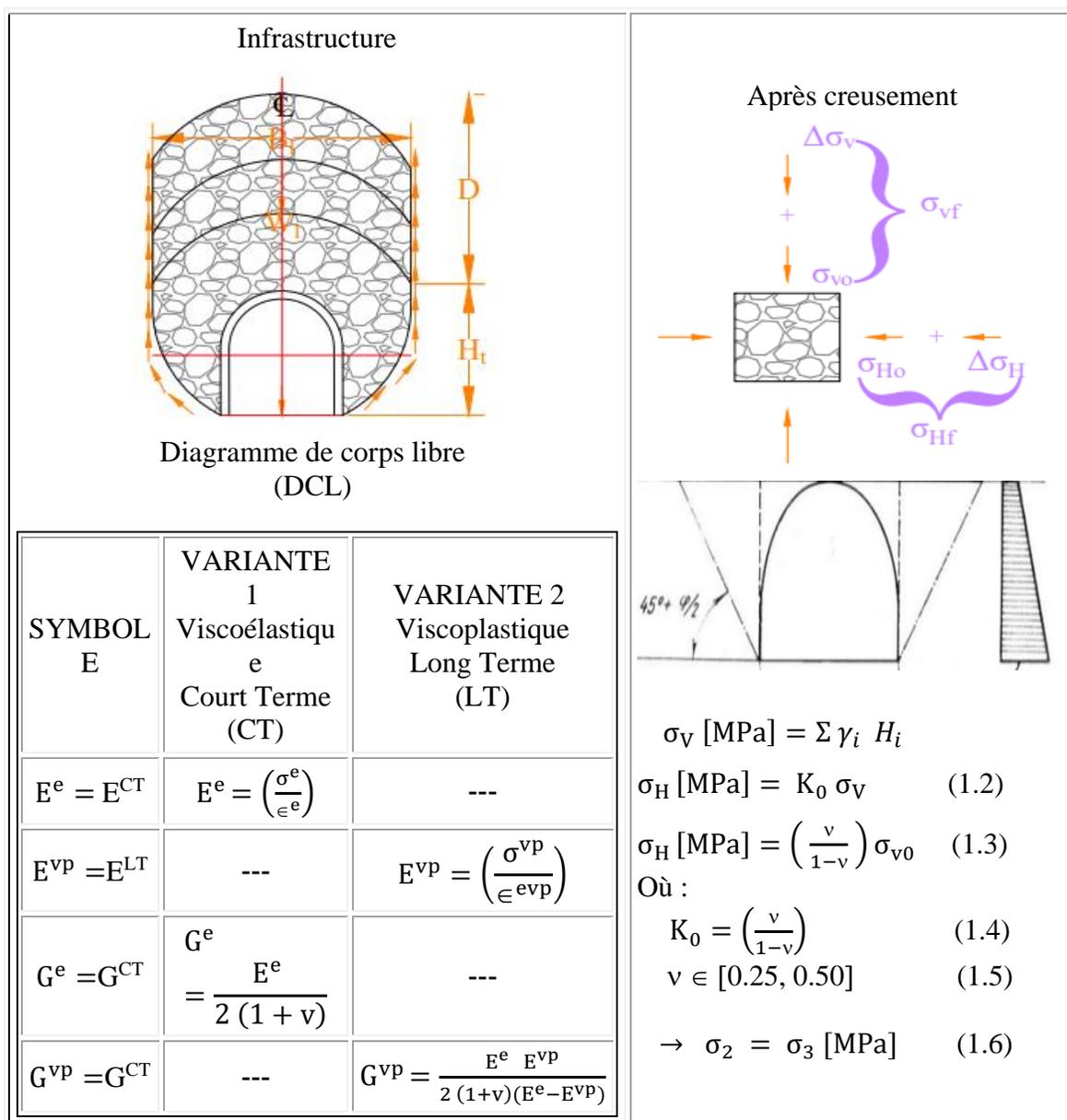


Figure 1.1 : Triaxialité des contraintes normales ( $\sigma = \sigma_{ii} = \frac{F_{ii}}{A}$  où  $i = j$ )  
et de cisaillement ( $\tau = \sigma_{ij} = \frac{F_{ij}}{A}$  où  $i \neq j$ ) (Margerès, 2015; Bailon et Dorlot, 2019).

<sup>11</sup> Charges vives : Poids du roc transféré aux murs d'une excavation souterraine. Les charges sont de 2 classes : a) charges actives. b) charges passives. Les charges actives sont synonymes de contraintes de poussées tandis que les charges passives sont synonymes de contraintes de butées.

A remarquer les contraintes se représentent sous la forme triaxiale. (Voir Figure 1.1 pour des détails). Les éléments géologiques influencent la grandeur et l'orientation du tenseur de contraintes. «*Quelques paramètres influençant cet état sont entre autres : a) la topographie; b) l'érosion; c) les contraintes résiduelles; d) les contraintes tectoniques; e) les discontinuités et fractures*» (Amadei et Stephanson, 1997).

a) Charges vives de cisaillement dues aux perturbations excavatrices ( $V_i$ )



Encadré 1.2 : Méthode d'évaluation des charges de cisaillement (DEV)

« Le phénomène appelé terrain poussant (*squeezing rock*<sup>12</sup>) dans les galeries minières permet de mettre en évidence l'influence des éléments géologiques tels les failles majeures et / ou le contact des plaques tectoniques sur l'orientation des contraintes principales. À l'échelle locale, les facteurs d'influence de l'état de contraintes *in situ* peuvent être unifiés par région géologique » (Arjang, 1989; Herget, 1987; Gay, 1975).

Néanmoins, ces contraintes ou tenseurs régionaux sont influencés par les éléments géologiques à plus petite échelle. « Ces éléments géologiques peuvent être, par exemple, un contraste local de densité et de rigidité » (Heidbach, 2008), « la présence d'une faille » (Matsuki, Nakama, et Sato, 2009) ou « la topographie de surface » (Gravel, 2012). Voir Encadré 2.2 pour des détails sur l'évaluation des charges de cisaillement.

b) Charges vives de schistosité dues aux perturbations sismiques ( $Q_i$ )

L'état limite ultime ou plastique considère qu'il y a ruine de la structure lorsqu'il y a un mécanisme de ruine provoquant l'instabilité de la structure c'est-à-dire l'apparition de la première rotule plastique. Le calcul des charges vives de schistosité dues aux perturbations sismiques ( $Q_i$ ) se fait sur la base de contraintes admissibles. Voir Encadré 1.3 pour des détails sur la schistosité dues aux perturbations sismiques ( $Q_i$ ).

$$M_R = \phi M_p \text{ (JSCE, 2006) ;} \quad (1.7)$$

$$M_p = Q \Delta d_{\text{anneau}} = \sigma_y Z_{\text{anneau}} \text{ (JSCE, 2006) ;} \quad (1.8)$$

$$Z = I / c_{\text{anneau}} \text{ (JSCE, 2006) ;} \quad (1.9)$$

Où :

- $M_R$  : Moment résistant
- $M_p$  : Moment de poussée
- $Q$  : charge sismique vive

---

<sup>12</sup> Selon la définition phénoménologique de la compression de roche adoptée par la Commission sur la compression des roches dans les tunnels (ISRM), la compression de la roche est la grande déformation dépendant du temps, qui se produit autour du tunnel, est essentiellement associée au fluage causé par le dépassement d'une contrainte de cisaillement admissible.

- $\Delta d_{\text{anneau}}$  : bras de levier
- $\sigma_y$  : Contrainte d'écoulement
- $\Phi$  : Coefficient de tenue ou de résistance des matériaux ( $\Phi > 1$ )
- $I_{\text{anneau}}$  : Inertie du matériau de l'enrobage
- $Z$  : ratio de l'inertie  $I$  et de la distance  $c$
- $C_{\text{anneau}}$  : distance de l'axe neutre à la fibre extrême du matériau

(DCL)

Structure

Note :  
 Voir Annexe F : Analyse de l'anneau des tunnels sous des contraintes naturelles et induites.  
 Où :

Table de rigidité ( $K_i$ ) des sections du tunnel Sedren

ID	Galerie Mémé		Galerie Casséus		
	$K_r = ?$ (Unité)	$K_t = ?$ (MPa)	$K_r = ?$ (MPa)	$K_t = ?$ (MPa)	
Modules	$E_{st}$	5026.0	2011.0	3351.0	1340.0
	$E_{th}$	2094.0	838.0	1396.0	559.0
	SOFZ	1131.0	452.5	754.0	301.6

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} ; \quad (2.10)$$

$$K_r = \frac{E_r b \theta}{(1+\nu_r)} ; \quad (2.11)$$

$$K_t = \frac{0.5 K_r}{(1+\nu_r)} ; \quad (2.12)$$

$M_z = Mp = Q \Delta d_{\text{Forme en D}} ;$

$M_z = Mp = \sigma_y Z_{\text{Anneau en D}} ;$

$Z = I / c_{\text{Anneau en D}}$

Encadré 1.3 : Méthode d'évaluation des charges de sismicité (DEQ)

c) Combinaison de charges ( $U_f$ )

Dans le cas d'état limite ultime, la règle de base de construction veut que la résistance pondérée soit supérieure à l'effet des charges <sup>13</sup> pondérées. De ce fait, les critères de chargement ou sollicitations sont spécifiés ainsi :

$$\Phi R_n > U_f \quad (1.13)$$

Où : Charges combinées = Charges mortes + Perturbations ou Charges vives pondérées

Et l'équation de *combinaison des charges dominantes pondérées* selon la Figure 1.2 s'écrit ainsi :

$$U_f = \sum \alpha_i D_i + \Psi_i P_i ; \quad (1.14)$$

$$U_f = D_f + P_f = D_f + (V_f + Q_f) = \alpha D + \Psi (V + Q) = 1.05 D + 1.3 (V+Q) ; \quad (1.15)$$

$\Phi$  : Coefficient de résistance des matériaux ( $\Phi > 1$ )

$R_n$  : Résistance nominale

$U_f$  : Effets des sollicitations pondérées

$\alpha_i$  : Facteur de charges mortes ( $\alpha = 1$ )

$D_i$  : Effets des charges mortes

$\Psi_i$  : Facteur de perturbations pondérées ( $\Psi = 1.3$ )

$P_f$  : Effets des perturbations (charges vives V et Q)

$V_i$  : Effets des charges vives de cisaillement

$Q_i$  : Effets des charges sismiques vives

---

<sup>13</sup> On retrouve comme exemples d'effets de charges : a) moment fléchissant (M), (b) efforts tranchants (V), (c) charges axiales de compression ( $N_C$ ), ou charges axiales de tension ( $N_T$ ).

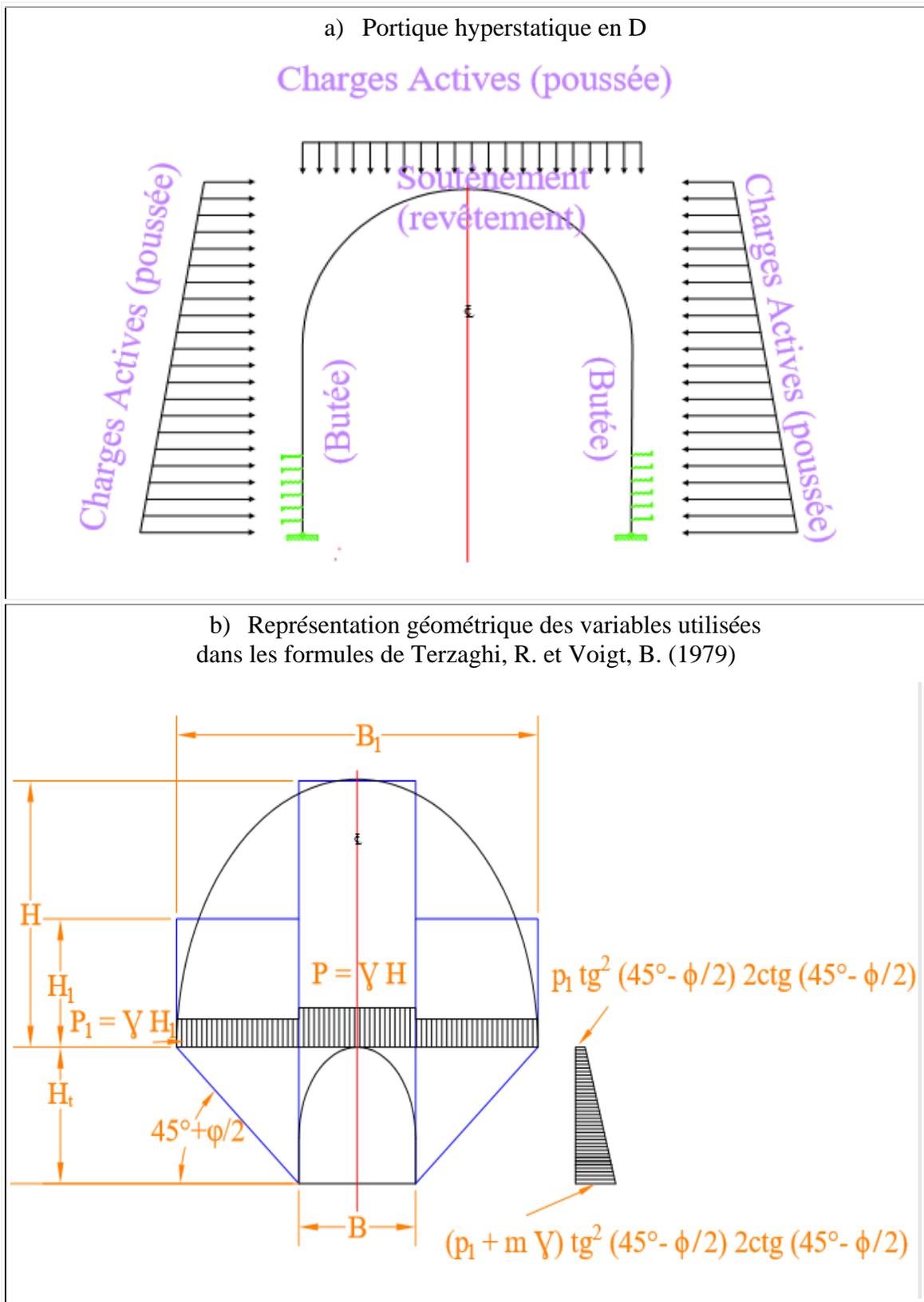


Figure 1.2 : Diagramme de corps libre (DCL) des charges combinées

Tableau 1.1 : Spécifications standards pour le calcul d'efforts axiaux et de moments fléchissants de l'enrobage d'un tunnel (JSCE, 2006)

Chargement	Moments fléchissants	Efforts axiaux
Charge verticale	$M = \frac{1}{4}(1 - 2 \sin^2 \theta)(p_{e1} + p_{w1})Rc^2$	$N = (p_{e1} + p_{w1})Rc \times \sin^2 \theta$
Charge horizontale	$M = \frac{1}{4}(1 - 2 \cos^2 \theta)(q_{e1} + q_{w1})Rc^2$	$N = (q_{e1} + q_{w1})Rc \times \cos^2 \theta$
Charge triangulaire horizontale ( $q_{e1} - q_{w1}$ )	$M = \frac{1}{48}(6 - 3 \cos \theta - 12 \cos^2 \theta + 4 \cos^3 \theta)(q_{e2} + q_{w2} - q_{e1} - q_{w1})Rc^2$	$N = \frac{1}{16}(\cos \theta + 8 \cos^2 \theta - 4 \cos^3 \theta)(q_{e2} + q_{w2} - q_{e1} - q_{w1})Rc$
Portance du rocher ( $q_r \cong k \cdot \delta$ )	$M = (0.2346 - 0.3536 \cos \theta)k \cdot \delta \cdot Rc^2$ $M = (-0.3487 + 0.5 \sin^2 \theta + 0.2357 \cos^3 \theta)k \cdot \delta \cdot Rc^2$	$N = 0.3536 \cos \theta \cdot k \cdot \delta \cdot Rc$ $N = (-0.7071 \cos \theta + \cos^2 \theta + 0.7071 \sin^2 \theta \cdot \cos \theta)k \cdot \delta \cdot Rc$
Poids mort ( $Pg_i = \pi g_i$ )	$M = \left( \frac{3}{8}\pi - \theta \cdot \sin \theta - \frac{5}{6}\cos \theta - \frac{1}{2}\pi \sin^2 \theta \right) g \cdot Rc^2$	$N = \left( \theta \cdot \sin \theta - \frac{1}{6}\cos \theta - \frac{1}{6}\cos \theta \right) g \cdot Rc$
Portance du rocher	En négligeant la portance du rocher dérivée du poids mort des résidus	
Déformation Horizontale de l'anneau à la ligne du ressort ( $\delta$ )	$\delta = \frac{(2(p_{e1} + p_{w1}) - (q_{e1} + q_{w1}) - (q_{e2} + q_{w2}))Rc^4}{24(\eta \cdot EI + 0.0454k \cdot Rc^4)}$ En considérant la portance du rocher dérivée du poids mort des résidus $\delta = \frac{(2(p_{e1} + p_{w1}) - (q_{e1} + q_{w1}) - (q_{e2} + q_{w2}) + \pi g)Rc^4}{24(\eta \cdot EI + 0.0454k \cdot Rc^4)}$	i) ii)
	Où EI : rigidité de flexion par unité de largeur	

Pour le cas d'un tunnel en D, les équations de la Société d'Ingénierie Civile du Japon (JSCE, 2006) basée sur la méthode de réactions hyperstatiques (Tableau 1.1) sont privilégiées. Le principe est d'étudier le comportement du soutènement (et du revêtement) sous l'action de charges extérieures. Des résultats préliminaires peuvent être obtenus à l'aide d'un logiciel de calcul de structure classique. La géométrie du soutènement est rentrée précisément pour un mètre linéaire de galerie sous forme de poutres 2D, puis on vient lui appliquer un chargement. On distingue alors des charges dites actives, qui sont indépendantes de l'état de déformation, et des charges dites passives qui sont les réactions hyperstatiques issues de la déformation du soutènement. La première catégorie regroupe la pression appliquée par le poids des terrains (verticale et horizontale), la pression hydrostatique si le tunnel traverse une nappe, le gonflement éventuel, le détachement d'un bloc, le poids propre du revêtement, la circulation routière à faible profondeur, etc. Les secondes charges sont les réactions de butée du terrain (Figure 1.2). Ces dernières sont considérées comme linéairement liées aux déplacements, ce qui permet de les modéliser par une série de ressorts, dont la rigidité  $K$  est issue des propriétés mécaniques de la roche ou du sol environnant.

### 1.1.3 Évaluation des contraintes principales

Comme les forces tectoniques sont l'une des principales source de contraintes naturelles à Haïti et qu'il n'existe pas encore de loi permettant de les quantifier. La seule façon fiable de les connaître demeure la mesure directe de ces dernières *avec* des techniques sophistiquées <sup>14</sup>. Certains chercheurs (Arjang, 1996; Herget, 1986; Corthésy et al., 1997) se sont attardés à colliger les résultats de ces mesures et les ont utilisés pour produire des modèles de prédiction basés sur leur traitement statistique.

---

<sup>14</sup> Techniques de mesure de contraintes utilisée au Canada : a) Principe du rétablissement (Vérin plat). b) Principe de récupération (Cellule CSIR, Cellule CSIRO, Cellule Doorstopper etc.). c) Principe fracturation.

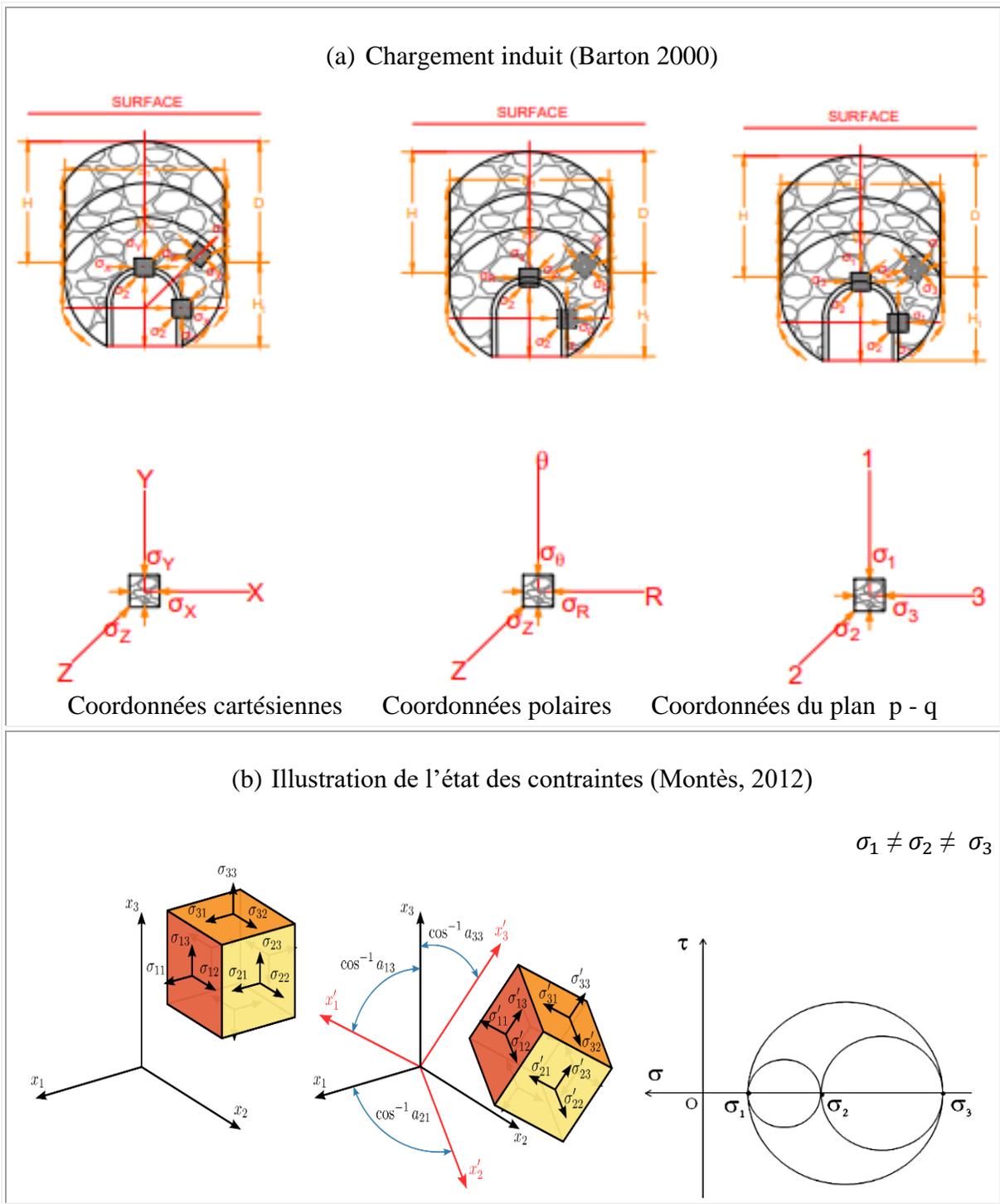


Figure 1.3 : Évaluation de contraintes maximale ( $\sigma_1$ ) et minimale ( $\sigma_3$ ). L'évaluation des coordonnées du plan p - q s'obtient à partir des données et résultats obtenus de coordonnées cartésiennes et/ou polaires.

Dans le cas de l'enfouissement selon Hoek-Brown (1986), « un massif rocheux subit selon l'axe vertical une pression créée par le poids des roches sur-encombrantes qui correspondent à  $\sigma_1$ ; il subit dans le plan horizontal l'action des roches voisines exerçant une pression de confinement exprimée par  $\sigma_2$  et  $\sigma_3$  qui sont égales ( $\sigma_2 = \sigma_3$ ) ».

$$\text{Tenseur de contraintes principales}^{15} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix} \quad (1.15)$$

La Figure 1.3 complète la théorie sur « L'évaluation des contraintes principales » applicables aux fins de trouver la contraintes de confinement. L'Annexe E donne des détails sur la « Théorie des critères de design structural » applicables.

Talobre (1967) est l'un des premiers à formuler l'hypothèse suivante :

*« Étant donné l'incapacité des roches à supporter un déviateur de contraintes élevé, combiné avec l'existence de déformations différées dans les roches, l'état de contraintes lithostatique, caractérisé en tout point par un tenseur de 3 contraintes principales<sup>16</sup>, est égal au poids du terrain surencombant ».*

## 1.2 Synthèse des risques environnementaux

L'industrie minière est en plein essor avec l'importance accrue des matières premières et la nécessité de l'autonomie économique se fait sentir dans plusieurs pays. De ce fait, les mines sont réactivées après leur abandon pendant de longues périodes pour des raisons de fluctuation des prix.

---

<sup>15</sup> Dans le cadre de cette recherche, le choix d'appliquer les théories de Mohr-Coulomb modifié (Hoek-Brown, 1980, 1986 et par Montès, 2012, 2013) comme critères de rupture de design structural sera justifié au Chapitre 3.

<sup>16</sup> Le tenseur de 3 contraintes principales s'exprime aussi selon les contraintes appelées majeure ( $\sigma_1$ ), mineure ( $\sigma_3$ ) et intermédiaire ( $\sigma_2$ ). Ils ont leurs orientations (direction et plongée) propres.

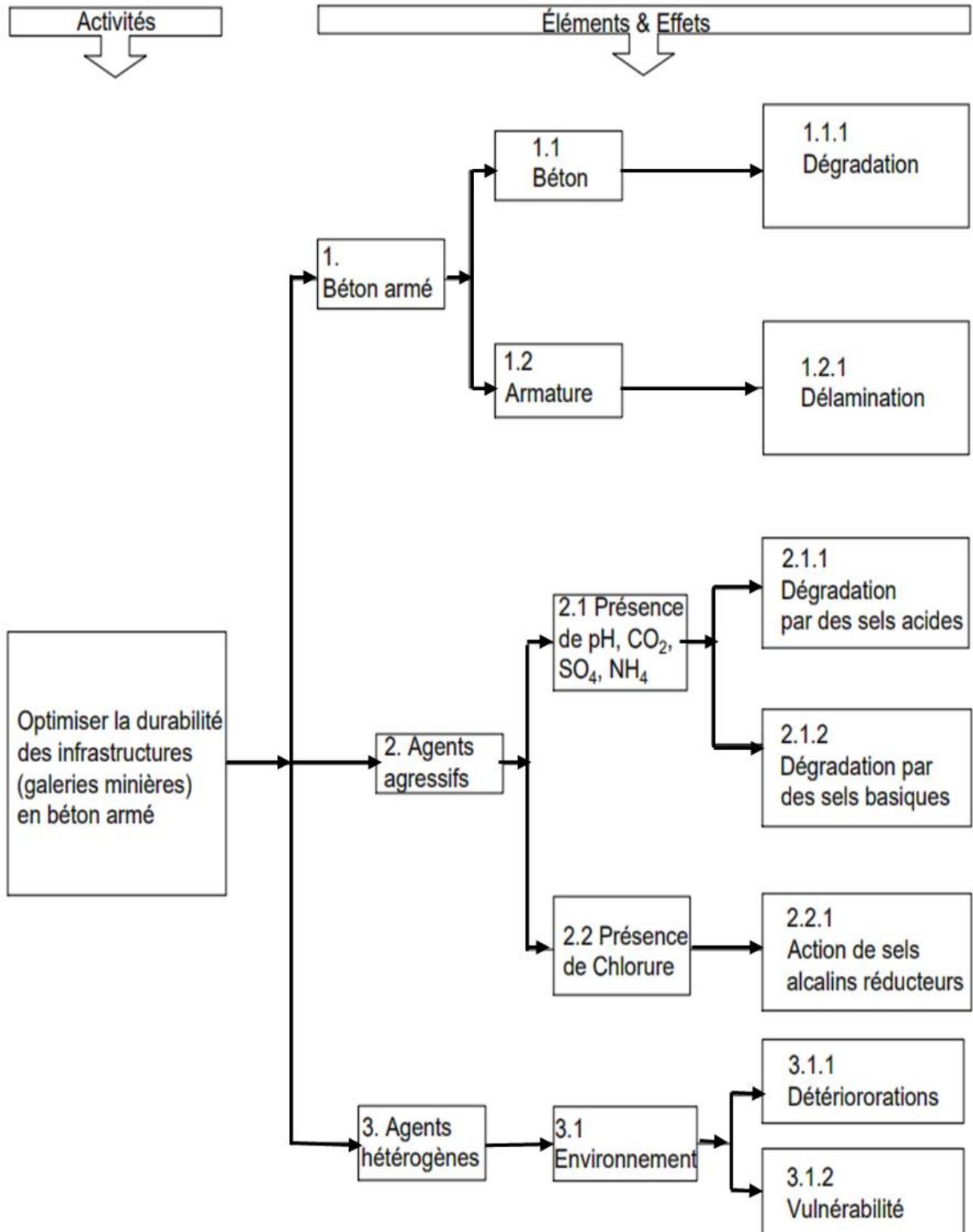


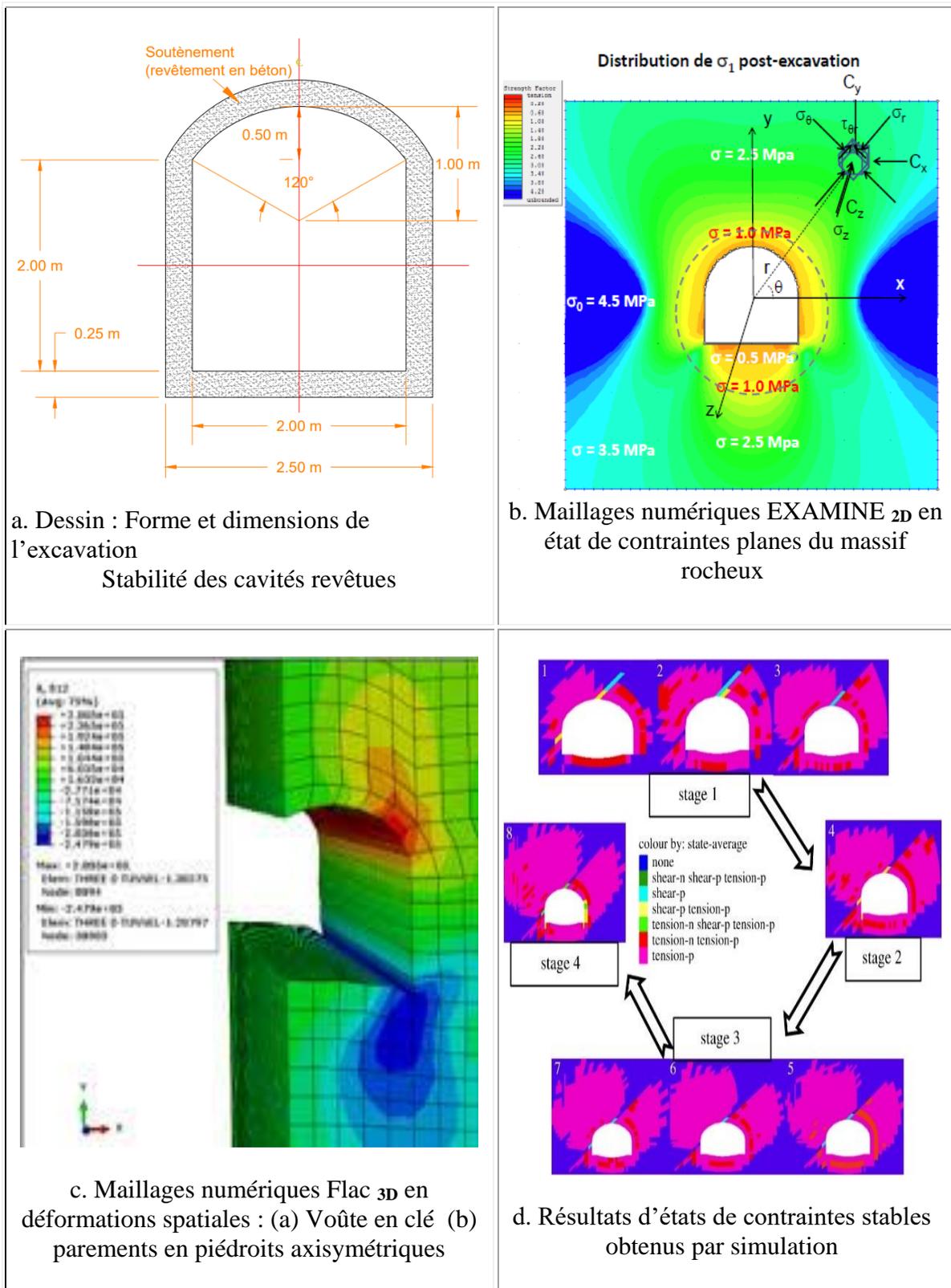
Figure 1.4 : Phénomènes de dégradation de l’anneau en béton armé des galeries souterraines. Deux agents chimiques externes ont été retenus pour les risques de corrosion : a) la teneur en agents agressifs (pH, CO<sub>2</sub>, SO<sub>4</sub>, Cl etc.) b) les hétérogénéités. (Adapté de Bailon et Dorlot, 2019)

La reprise des opérations nécessite des travaux de stabilisation coûteux et le développement de nouvelles technologies dont l'adoption est justifiée pour répondre aux nouvelles contraintes environnementales de bien-être et de sécurité accrue. L'aspect géochimique, responsable de l'altération accélérée des revêtements ou l'affaissement des armatures d'acier est à prévoir dans l'éventualité des opérations. Dans un même ordre d'idées, il faut inclure les risques d'accidents pour assurer l'acceptabilité socio-économique.

La Figure 1.4 synthétise les phénomènes de dégradation, de délamination, de détérioration et de vulnérabilité des revêtements en béton des galeries de mines souterraines dus à la chimie des éléments et aux effets environnementaux.

### 1.3 Comportement différé des ouvrages souterrains

Les massifs rocheux ne sont jamais parfaitement élastiques, plastiques ou visqueux. De plus, leur comportement peut changer au cours de leur déformation. Dans le cas général, ils combinent les propriétés des 3 types fondamentaux. C'est le cas des roches qui sont élastiques pour une contrainte faible et deviennent plastiques lorsque la contrainte devient plus forte. Le passage du comportement élastique au comportement plastique s'appelle le durcissement: la roche subit des modifications irréversibles dans sa structure. La déformation de la roche peut rester ductile, mais s'accroître au cours du temps, bien que la valeur de la contrainte reste constante: c'est le fluage. Dans d'autres cas, il apparaît une rupture, la roche devient fragile. Des difficultés existent pour prédire le comportement différé des ouvrages souterrains et cela soulève des interrogations pour obtenir un système modélisable, simulable, valide.



Scripts EXAMINE<sub>2D</sub>, PLAXIS<sub>2D</sub> et FLAC<sub>2D</sub>  
Figure 1.5 : Exemples types de modèles simulables et valides

Des hypothèses doivent être prises en compte telles :

a) Forme et dimensions de l'excavation. Voir Figure 1.5.a et c.

- Roc infini ou semi-infini à surface horizontale (théorie de Boussinesq).
- Voûte en clé<sup>17</sup> et parements<sup>18</sup> en piédroits axisymétriques.

b) État des contraintes du massif rocheux. Voir Figure 1.5.b

- Contraintes naturelles à l'excavation.
- Axe du souterrain parallèle à l'un des axes principaux des contraintes.

c) Loi de comportement du massif rocheux. Voir Figure 1.5.c et d.

- Élasto-viscoplasticité d'un matériau isotrope et homogène.
- Pressions d'eau, transfert de chaleur, diffusion de l'air particules en suspension, etc.

d) Stabilité de cavités revêtues. Voir Figure 1.5.a.

- Adhérence et glissement parfaits à l'interaction roc / revêtement de l'infrastructure.

Les mécanismes responsables de l'effondrement d'une galerie souterraine (durant sa vie utile) peuvent provenir de quatre mécanismes mentionnés: le fluage, le cisaillement, la délamination et le gonflement. Chacun de ces mécanismes doit leur origine aux différentes propriétés du matériau analysé.

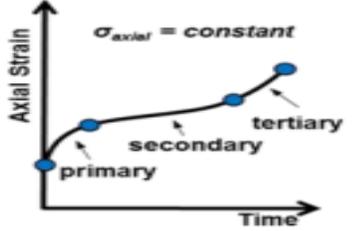
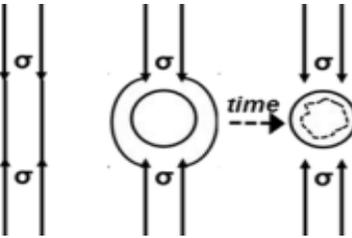
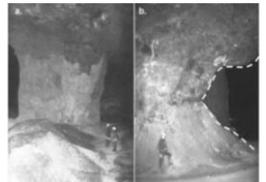
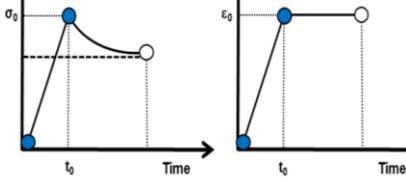
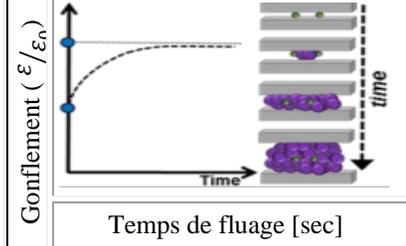
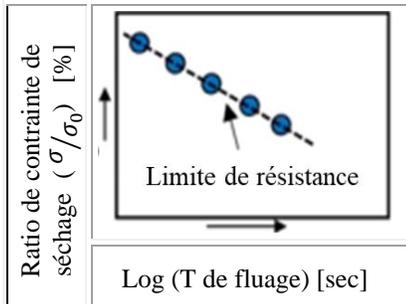
Le Tableau 1.2 dresse les mécanismes responsables de l'effondrement des galeries souterraines.

---

<sup>17</sup> Voûte en clé (arch, dome): Portion de roche laissée à l'intersection d'une paroi et du toit, généralement pour réduire les concentrations de contraintes à cet endroit. La clé de voûte (crown) est la portion la plus haute du toit (couronne) du tunnel.

<sup>18</sup> Parement (wall): Paroi latérale verticale ou très inclinée d'une voie (galerie, montage) ou d'un chantier.

Tableau 1.2 : Mécanismes responsables de l'effondrement d'une galerie souterraine (durant sa vie utile) (Adapté de Paraskevopoulou, 2016 et Hammoun, 2017)

Exemples –Types	Illustrations	Mécanismes
<p>Fluage</p>  <p>M. Diederichs Diederichs, 2013</p>	 <p><math>\sigma_{axial} = \text{constant}</math></p>	<p>Fluage : <math>\Delta V = 0</math> et <math>\sigma = \text{constante}</math> Déformation en fonction du temps des roches et du massif rocheux soumis à une contrainte constante inférieure à la résistance à court terme</p>
<p>Terrain poussant</p>  <p>Read, 2004</p>		<p>Terrain poussant Grande fermeture vers l'intérieur des tunnels en fonction du temps qui peut entraîner une rupture par cisaillement, flambage ou glissement.</p>
<p>Relaxation</p>  <p>Hoek-Brown, 2002</p>	 <p><b>Courbe Relax. ↘ ou Courbe Relax. →</b></p>	<p>Relaxation : <math>\Delta \sigma \neq 0</math> Diminution de la contrainte en fonction du temps alors qu'au moins une déformation principale est contrainte (confinée) et reste constante.</p>
<p>Gonflement</p>  <p>N. Isago Pineau, 1976</p>	 <p>Temps de fluage [sec]</p>	<p>Gonflement : <math>\Delta V = 0</math> Augmentation de volume en fonction du temps causée par l'absorption d'eau dans la zone proche de l'excavation.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Processus de déconfinement.</li> <li>- Processus osmotique.</li> <li>- Processus intra-cristallin.</li> </ul>
<p>Dégradation</p>  <p>Hoek-Brown, 2002</p>	 <p>Ratio de contrainte de séchage (<math>\sigma/\sigma_0</math>) [%]</p> <p>Limite de résistance</p> <p>Log (T de fluage) [sec]</p>	<p>Dégradation / Érosion : <math>\Delta V \neq 0</math> Perte de résistance en fonction du temps assistée chimiquement et entraînée par la corrosion sous contrainte.</p>

### 1.3.1 Investigations expérimentales au laboratoire

Au laboratoire, le comportement différé des roches est généralement mis en évidence à partir de trois principaux types d'essais : des essais de fluage, des essais de relaxation et des essais de chargement mécanique à vitesse imposée.

#### a) Étude du fluage

Le premier mécanisme rhéologique dans le comportement mécanique des excavations souterraines est le fluage <sup>19</sup>. Selon Malan (1999), « *C'est un essai qui consiste à appliquer une contrainte constante au matériau que l'on veut analyser et étudier sa déformation en fonction du temps* ».

La Figure 1.6 de Sander et al. (2018) illustre le changement du taux de déformation pour les trois différentes étapes de fluage et de relaxation avec les courbes de contraintes et de déformation totale versus le temps.

#### b) Étude de la relaxation

La relaxation, telle qu'illustrée à la Figure 1.6, est un essai complémentaire au fluage. Durant cet essai, on applique de façon instantanée une certaine déformation constante au matériau et l'on enregistre l'évolution de la contrainte en fonction du temps.

---

<sup>19</sup> De nombreux chercheurs ont étudié le comportement de fluage depuis le début du XXe siècle (Weaver en 1936 aux roches; Griggs, 1939; Perzyna, 1966; Singh, 1975; Goodman, 1980; Aydan et coll. 1993; Einstein, 1996; Boukharov et coll. 1995; Malan et al. 1997, 1999; Cristescu et Hunshe (1998); Hudson et Harrison, 2000; Berest et coll. 2005, Shersta, 2005; Hargos et coll. 2008; Brantut et coll. 2013).

Weaver en 1936 a été l'un des premiers chercheurs à appliquer la théorie de fluage aux roches. Cependant, il a observé que le fluage en tant que terme a été mal utilisé dans la littérature. Selon Cristescu et Hunshe (1998), le fluage est une déformation irréversible qui se produit sans fracturation et est principalement observé dans les roches tendres.

En revanche, Malan (1999) a observé que les roches fragiles lorsqu'elles sont soumises à des conditions de contrainte spécifiques peuvent présenter une déformation continue au fil du temps, conduisant à baisse instabilité plastique. Le lien mécanique entre fluage et affaiblissement retardé (rendement) n'est souvent pas discuté dans ces circonstances.

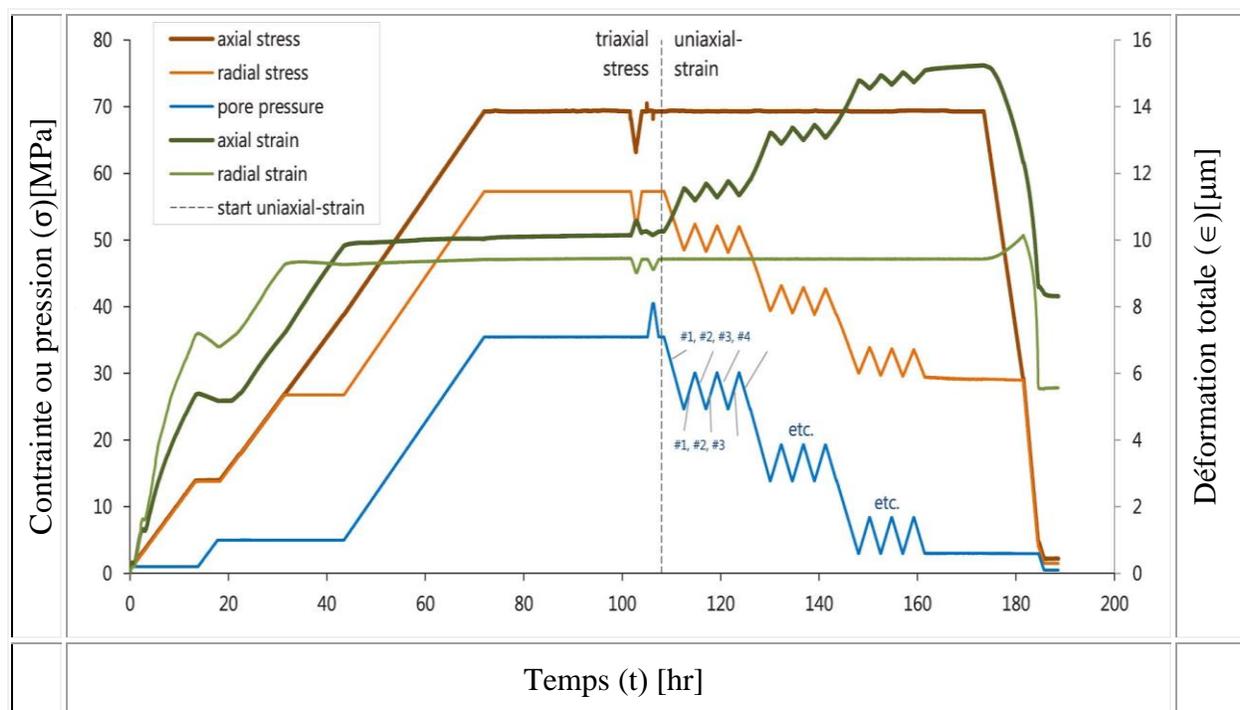


Figure 1.6 : Courbes contraintes de fluage et de relaxation (Sander et al., 2018). - Localisation de la relaxation d'un matériau soumis au fluage.

Le comportement au fluage dans les solides peut être généralement décrit par la forme typique de courbe de fluage qui se caractérise par trois étapes distinctes (Figure 1.6). Ces étapes ont été introduites pour la première fois par Da Andeade en 1910 pour les métaux. « *Les matériaux rocheux présentant une déformation par fluage ont un taux de déformation variable avec le temps* » (Amitrano et Helmstetter, 2006). En réalité, dans ce concept mathématique se trouvent les trois étapes du fluage (résumé par Goodman, 1980) qui suivent une réponse instantanée au changement de conditions limites résultant d'un état de contrainte constant.

Au cours d'un essai triaxial en compression sous déviateur constant, le fluage des roches se décompose en 3 phases. Ces étapes peuvent être interprétées et simulées comme suit :

- 1<sup>ère</sup> étape : fluage primaire ou transitoire où l'ajustement retardé à un nouvel équilibre l'état se produit par déformation viscoélastique (réversible), et peut être accompagné de certains comportements irréversibles, entraînant une accumulation de contraintes avec une vitesse décroissante au fil du temps. Cette étape est généralement simulée avec l'analogie du modèle Kelvin-Voigt (1850). « *La première phase dite de fluage primaire ou transitoire est caractérisée par la décroissance de la vitesse de déformation.* » (Barla et Barla., 2008).

- 2<sup>ème</sup> étage : fluage secondaire où le matériau présente une accumulation de taux de déformation constante au fil du temps accompagné d'une distorsion inélastique. La durée voire l'existence de cette étape peut varier en fonction de la capacité du type de roche. Le modèle viscoélastique de Maxwell (1867) est couramment utilisé pour représenter phénoménologiquement cette étape. *« Cette seconde étape dite de fluage secondaire ou stabilisée, correspond à une vitesse de déformation constante »*. (Lemaître et Chaboche, 1988).

- 3<sup>ème</sup> étage : stade tertiaire où de fortes déformations non linéaires ou accélératrices se produisent (entraînant la rupture du matériau) en raison d'un affaiblissement dû à la déformation, résistance liée chimiquement dégradation et / ou interaction de fissures croissantes. Les modèles viscoplastiques et / ou les modèles dits de corrosion sous contrainte (Damjanac et Fairhurst, 2010) sont utilisés pour simuler des glissements. *« Cette troisième étape dite de fluage tertiaire, correspond au phénomène d'endommagement (détérioration du matériau qui conduit à la rupture), rend compte d'une augmentation de la vitesse de déformation jusqu'à la rupture du matériau »* (Barla et Barla., 2010).

c) Le chargement mécanique (traction / compression) à vitesse imposée

Le chargement mécanique est un essai important et utile pour la formulation de conditions frontières. Dans cet essai tel qu'illustré à la Figure 1.7, on applique une vitesse de déformation constante au matériau que l'on veut analyser et l'on étudie l'évolution de la contrainte en fonction du temps (Lemaître et Chaboche, 1988). Ces raisons amènent un lot de défis importants pour la communauté scientifique.

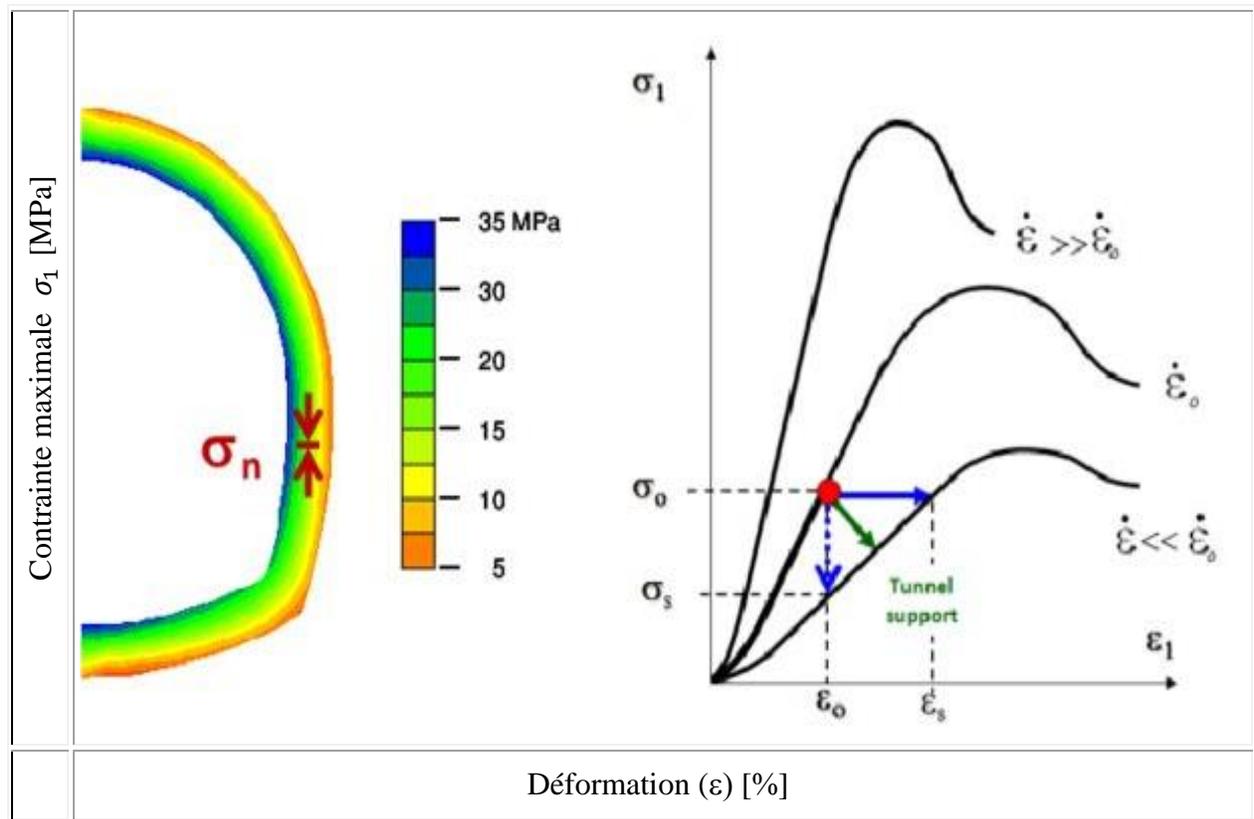


Figure 1.7 : Concept de la courbe limite du déviateur équivalent versus la déformation du matériau (Lemaître et Chaboche, 1988 et Pellet, 2018)

En outre, dû au fait que les galeries souterraines, liées à des phénomènes de consolidation, de gonflement, d'effondrement, de fluage / relaxation présentant des caractéristiques mécaniques médiocres et générant des déformations dans le temps, elles font l'objet d'augmentation significative d'études de stabilité physique.

Le creusement d'une galerie souterraine est un processus conduisant à charger le terrain de manière relativement lente, 1000 à 10 000 fois plus lentement qu'en laboratoire. Or, une étude, réalisée sur les marnes de l'Aptien, montre que « la diminution de la vitesse de chargement se traduit par une réduction significative de la résistance » (Kleine, 2007) telle qu'illustrée à la Figure 1.8.

L'étude de la revue globale de la littérature nous a appris que le comportement visqueux d'un massif rocheux dépend de la vitesse de sollicitation. Si la vitesse est faible, les déformations visqueuses produisent tout au long de la sollicitation.

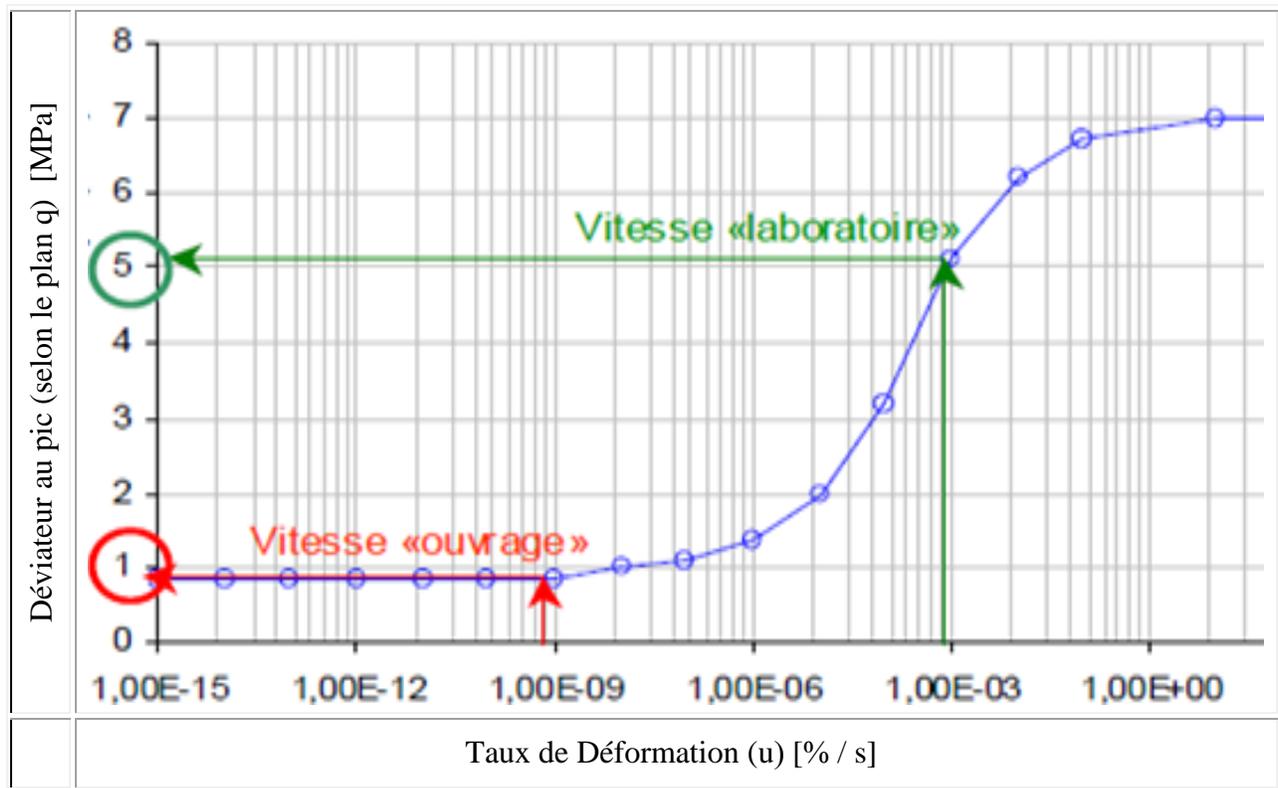


Figure 1.8 : Diagramme d'évolution de la résistance en compression simple versus la vitesse de déformation (Kleine, 2007)

### 1.3.2 Investigations expérimentales in situ

En chantier, le comportement différé des galeries souterraines peut produire plusieurs types d'effets différés, par exemple : une augmentation de la contrainte en fonction du temps pour le soutènement, ou une évolution des déplacements radiaux de la paroi des galeries souterraines et un tassement à la surface pour le massif. Cet effet est très important et on ne peut pas le négliger. Dans certains cas, « la déformation différée peut atteindre jusqu'à 80% de la déformation totale » (Rousset, 1988).

### 1.4 Phénomène des terrains confinés

Kawamoto, Aydan, Akagi et Ito (1991) relèvent 3 mécanismes lors du confinement d'une galerie :

- a) Rupture complète par cisaillement du massif rocheux ;
- b) rupture présente par flambage dans les roches métamorphiques ou litées ;
- c) rupture observée par cisaillement et glissement dans les plans de litages épais .

La déformation dans le temps du massif rocheux est un phénomène graduel difficilement discernable à court terme. Plusieurs auteurs se sont attardés sur le développement des critères pour évaluer le potentiel de confinement dans les galeries minières (Aydan et al., 1996; Barton, 2000; Carter, 1992; Hoek et Marinos, 2000; Mercier-Langevin et Hadjigeorgiou, 2011; Singh et Choudhari, 2007). Dans des essais de fluage en laboratoire, les paramètres visqueux d'un modèle sont évalués par calage sur les *Courbes d'essais de fluage* (Purwodihardjo, 2004).

#### 1.4.1 Mécanismes d'instabilités et de déformabilité d'une cavité souterraine

« *L'instabilité d'une galerie souterraine est le processus qui illustre que la forme, qu'on veut donner à la cavité ou lui assurer par un soutènement ; ou qu'on lui a déjà donnée ou assurée, change* » (Leite, 2010). De ce fait, « *le suivi et contrôle des massifs rocheux de façon stable et sécuritaire est l'une des meilleures alternatives pour résoudre le problème de stabilité de galeries souterraines* » (Corthésy et al., 1997). Ce choix résulte des effets de l'excavation puisque l'action d'excaver un massif modifie l'état des contraintes dans la zone de confinement qui existe préalablement dans le massif rocheux autour de la cavité en question. À savoir : il n'existe que deux principaux types de mécanismes d'instabilités. Voir Figure 1.9.

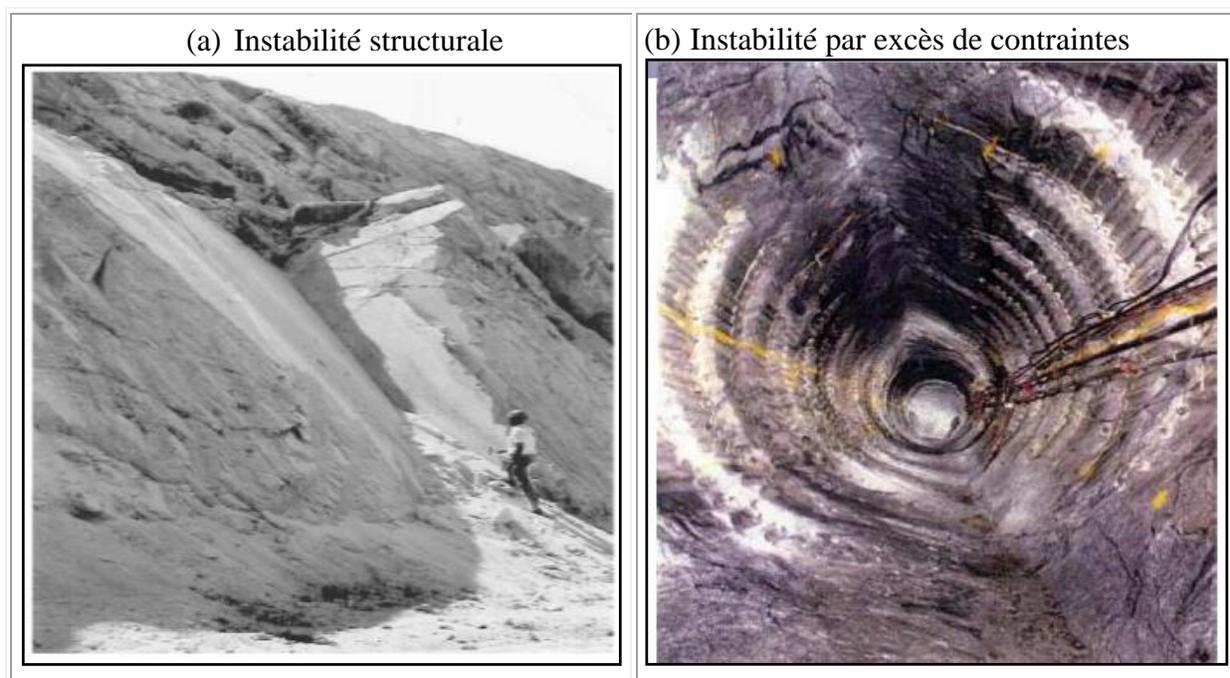


Figure 1.9 : Concepts d'instabilités structurales (Hoek-Brown, 2007) et contraignables (Read, 2004)

a) Instabilité induite par les effets structuraux : Ce mécanisme est caractérisé par le glissement et/ou la chute de polyèdres de roches découpés par des discontinuités géologiques. « *De la blocométrie<sup>20</sup> jusqu'à la rupture* » (Fine, 1998).

b) Instabilité induite par excès de contraintes<sup>21</sup> : Ce mécanisme est caractérisé par la rupture du massif rocheux, c'est-à-dire par un dépassement de résistance ou par un excès de contraintes.

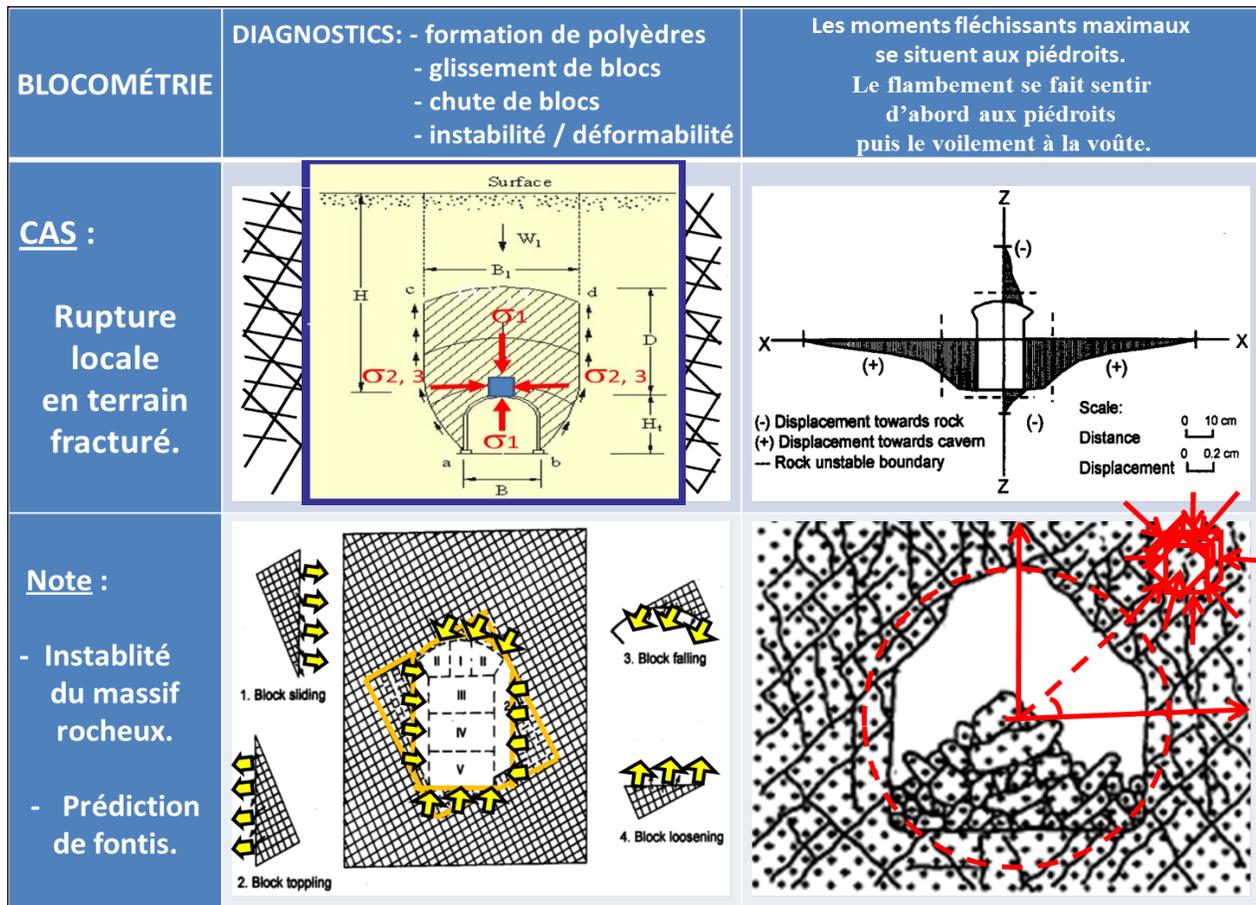


Figure 1.10 : De la blocométrie jusqu'à la rupture  
(Adapté de Fine, 1998 et Chau, 2004)

Dans notre recherche, nous ne considérons que les évolutions des instabilités produites par des excès de contraintes induites et des déformabilités globalement liées à l'aspect visqueux telles qu'illustrées à la Figure 1.10.

<sup>20</sup> Blocométrie (block) : Partie du gisement en forme de prisme comprise entre deux niveaux.

<sup>21</sup> Voir Annexe F portant sur « L'analyse des anneaux des tunnels sous des contraintes induites ».

**Niveau de contrainte relatif en fonction de la résistance du massif rocheux**

**Dimension relative des blocs par rapport à la dimension de l'ouverture souterraine**

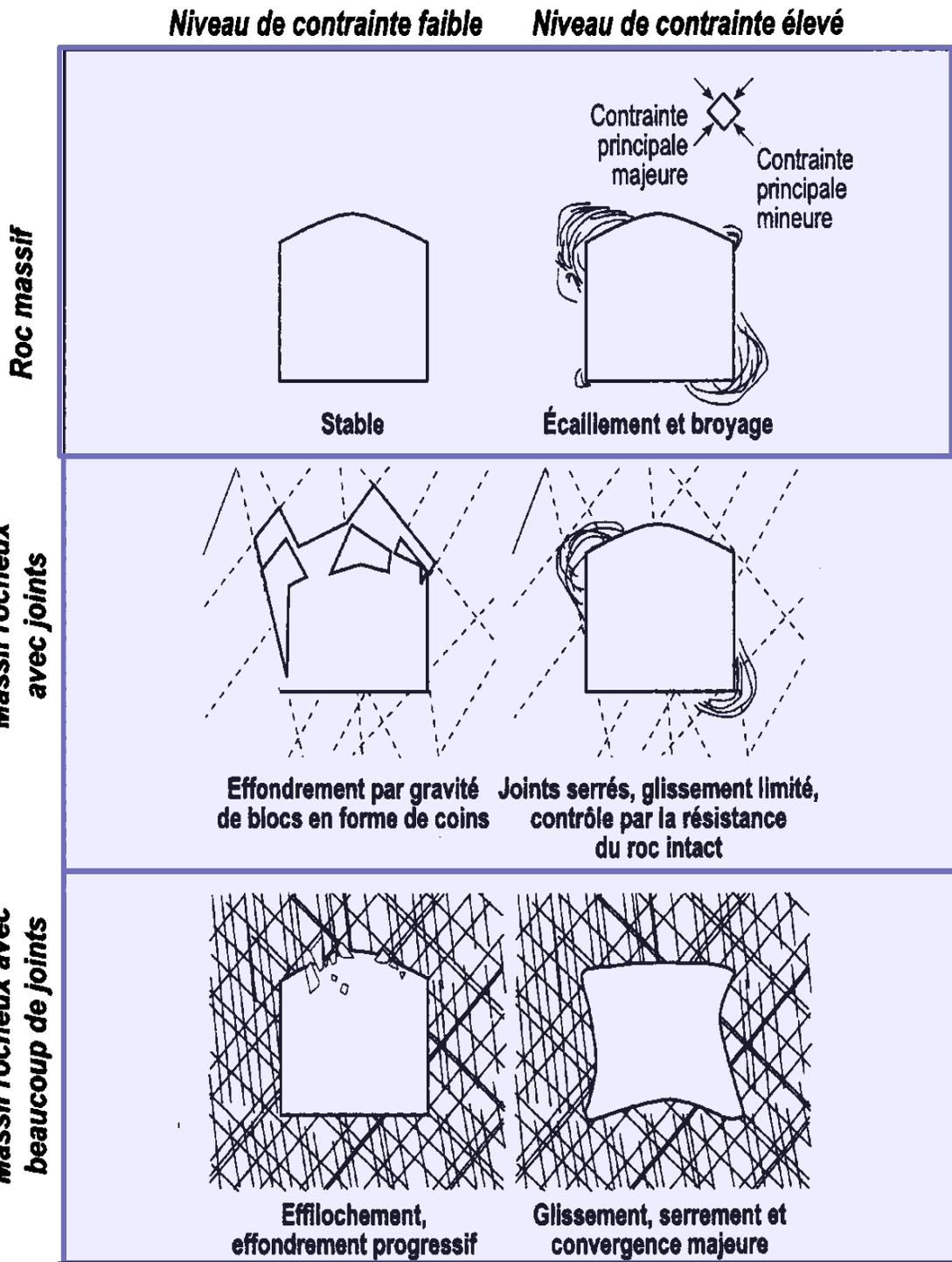


Figure 1.11 : Comportement du massif rocheux autour d'une excavation (Charrette et Hadjigeorgiou, 2009)

Les conditions de stabilité des galeries creusées dans les mines, modifiées à la suite d'une dégradation progressive de leur recouvrement et / ou de la mise en eau de ces galeries, ont été analysées (Pineau, 1976). Les effets des instabilités potentielles induits éventuellement en surface du sol ont été également quantifiés (Thoraval, 1997). Dans le cas le plus défavorable, les analyses réalisées prédisent l'apparition de fontis<sup>22</sup> en surface uniquement si les galeries sont très peu profondes et si les caractéristiques géomécaniques du massif rocheux et des discontinuités naturelles qui les affectent sont très faibles (Thoraval, 1997). Dès que la profondeur dépasse 8 mètres, la remontée de la cloche d'éboulement est bloquée avant d'atteindre la surface par l'effet de foisonnement des terrains éboulés (Piguet et Wojtkowiak, 2001). Voir Figure 1.11.

#### 1.4.2 Critères de stabilité structurale des terrains confinés

Plusieurs éléments à l'origine du phénomène de terrains confinés ont été identifiés dans la littérature : la présence et l'espacement d'une famille de discontinuités, l'orientation de l'excavation relativement à celle de la discontinuité, des contraintes in-situ élevées, une faible résistance mécanique de la matrice rocheuse et la présence d'altération géologique.

L'influence de la résistance est identifiée comme critique par Singh et al. (1992). Ils établissent que dans les études que : « *L'excavation sous le phénomène du terrain confiné est entourée d'un massif rocheux caractérisé par une faible résistance à l'écrasement. Le cisaillement est accompagné d'une expansion volumétrique suite à la rupture plastique du massif rocheux* ».

Le critère de rupture est établi en comparant la contrainte de cisaillement maximale ( $\sigma_\theta$ ) à la résistance équivalente à l'écrasement du massif rocheux ( $\sigma_R = \sigma_c$ ). Cette contrainte de cisaillement maximale est évaluée par la redistribution élastique autour de l'excavation. La résistance à l'écrasement peut être calculée par la méthode proposée par Hoek, Carranza-Torres et Corkum (2002).

$$\text{pour } \sigma : \sigma_R > \sigma_\theta ; \quad (1.17)$$

$$\text{pour } \tau : \tau_R > \tau_\theta ; \quad (1.18)$$

$$\text{il en est de même pour } M : M_R > M_f ; \quad (1.19)$$

---

<sup>22</sup> Un fontis est un effondrement du sol en surface, causé par la déliquescence souterraine progressive des terrains porteurs.

## 1.5 Causes des facteurs aggravants

Deux facteurs aggravants sont à considérer : l'instabilité et la déformabilité. Ces effets ont des causes : l'influence de l'eau, du temps et des actions anthropiques.

### a) L'influence de l'eau et du temps

De nombreux chercheurs (Brace et al 1966; Podnieks et al 1968; Beniawski, 1967; Martin, 1997, Diederichs, 2003, etc.) étudiant le comportement inélastique des roches ont indiqué que l'initiation de la fissure et sa propagation jouent un rôle prépondérant.

La présence d'eau peut aussi avoir une influence sur les propriétés mécaniques des terrains de recouvrement et donc sur la stabilité mécanique des ouvrages (Figure 1.12) « Une augmentation de la teneur en eau du matériau, sous l'effet des infiltrations d'eau superficielle ou du rabattement du niveau de la nappe phréatique, peut altérer la résistance mécanique des roches » (Pineau, 1976).

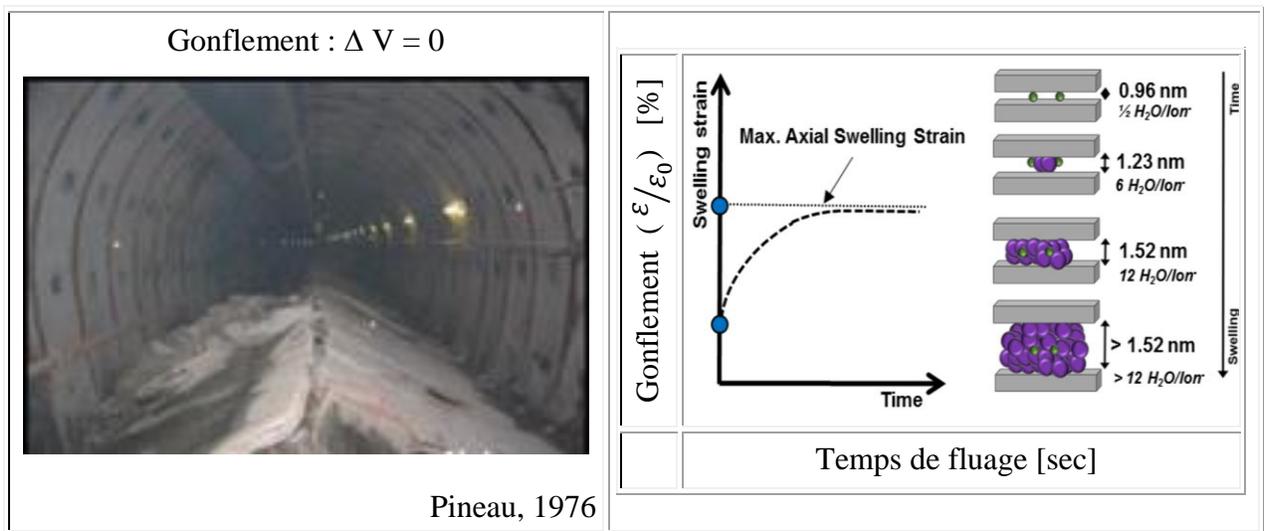


Figure 1.12 : Mécanisme de gonflement - Augmentation de volume en fonction du temps causée par l'absorption d'eau dans la zone proche de l'excavation. - Les modifications du régime hydraulique et d'écoulement des eaux souterraines au sein du massif lié ( Pineau, 1976).

Dans plusieurs cas, la résistance de certaines roches semble décroître de manière significative en fonction du temps (Figure 1.13). Il est donc nécessaire de prendre en compte le concept de résistance ultime, ou résistance admissible à long terme, pour évaluer l'évolution de la stabilité d'une cavité dans le temps.

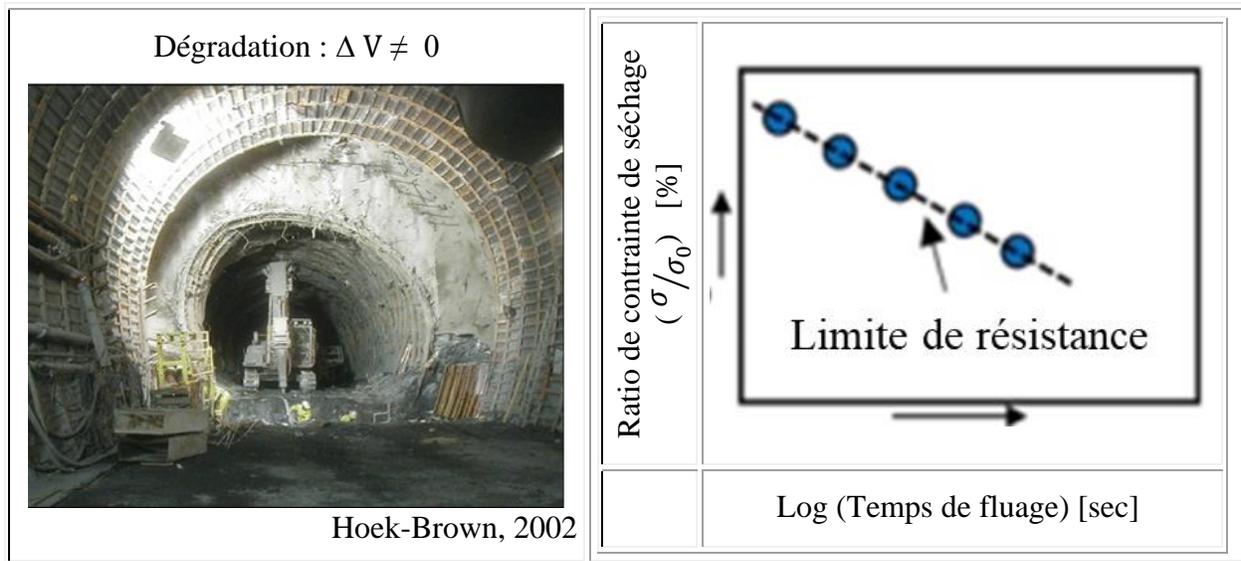


Figure 1.13 : Mécanisme de dégradation - Perte de résistance en fonction du temps entraînée par la corrosion sous contrainte (Hoek-Brown, 2002)

#### b) Les actions anthropiques

Les phénomènes d'origine anthropique, en modifiant les conditions mécaniques et hydrauliques qui règnent au sein du massif dans un sens pratiquement toujours défavorable, interviennent en tant qu'initiateurs ou accélérateurs des processus de dégradation (Thoraval, 1997).

Les principales perturbations de ce type sont les suivantes :

- Peng (1973) a examiné le comportement de relaxation sur trois formations rocheuses: le grès d'Arkose, le marbre du Tennessee et le grès de Berea. Peng (1973) a déclaré que la stabilisation de la propagation des fissures est obtenue.
- les surcharges pondérales, dues à la construction de nouveaux bâtiments ou d'ouvrages d'art (Thoraval, 1997);
- la circulation d'engins de fort tonnage en surface peut être à l'origine d'une fatigue des matériaux (Bertrand, Bonvallet, Both, Feuga et Wojtkowiak, 1982).
- Lodus (1986) a conclu que la libération d'énergie due à la relaxation des contraintes dans une ouverture souterraine pouvait être contrôlée en réduisant la vitesse de l'outil mécanique dans le front de taille.
- Li et Xia (2000) ont suggéré que cette observation pourrait être utilisée pour interpréter le comportement et évaluer la capacité de charge des piliers dans les sites miniers.

## 1.6 Applications aux galeries minières

Le comportement mécanique des cavités souterraines fait l'objet de nombreuses recherches tant expérimentales que théoriques (Ghoreychi, 1990, Hoek, 1995, Cristescu et al., 1998). Les mécanismes microscopiques responsables de la déformation des géomatériaux sont bien connus et intégrés dans les modèles rhéologiques. Ces différents mécanismes se traduisent par un comportement viscoplastique ou d'élasto-viscoplastique dépourvu de tout seuil.

Dans le cas d'une d'excavation minière, le comportement différé a une influence importante sur le comportement de l'ouvrage, particulièrement sur le fonctionnement du soutènement. Ce phénomène peut être lié à différents phénomènes physiques :

- pour le soutènement : durcissement du béton (béton projeté, béton armé ou non armé) et comportement visqueux des voussoirs en béton;
- pour le massif rocheux : fluage / relaxation, gonflement, consolidation, effondrement.

### 1.6.1 Connaissances du rôle de confinement du soutènement<sup>23</sup> des galeries

*« Le soutènement applique une contrainte sur la périphérie de l'excavation que l'on appelle la contrainte de confinement. Cette contrainte ( $\sigma'_3$ ) est appelée la contrainte de soutènement ou encore la contrainte de confinement. Le soutènement n'a pas pour but de supprimer les mouvements de terrain. Il a pour rôle de bloquer tout mouvement de convergence. La contrainte de confinement maximale ( $\sigma'_{3\max}$ ) ne dépasse guère 0.2 à 0.3 MPa alors que les contraintes naturelles se situent entre 2 et 20 MPa » (Fine, 1998).*

### 1.6.2 Connaissances de l'équilibre terrain-soutènement

La *convergence* d'une galerie souterraine est le rétrécissement diamétral d'une section de la galerie. Elle est fonction de la distance  $x$  entre la section de mesure et le front de taille, du temps  $t$  qui s'est écoulé depuis le passage du front de taille, de la distance non soutenue  $d$  derrière le front de taille<sup>24</sup> et de la rigidité du soutènement  $K$ .

---

<sup>23</sup> Soutènement (ground support): Dispositif de soutien des parois d'une excavation soit par :

- appuis (cadres, cintres, piles)
- suspension (treillis métalliques, boulons)
- tout autre moyen.

<sup>24</sup> Front de taille (face): Surface exposée après une coupe dans une galerie ou un chantier. La face est toujours orientée perpendiculairement à la direction d'avancement des travaux de minage. Suivant son inclinaison on distingue: a) Front horizontal; b) Front incliné; c) Front vertical.



### 1.6.3 Connaissances de procédés de soutènements du massif rocheux

Le revêtement de certaines galeries minières inspectées est fabriqué avec du béton projeté et des armatures (boulons de type ancrage) .

« Le facteur temps joue un rôle dans la déformation et le mouvement du massif rocheux à l'intérieur de la galerie et se définit par le déplacement ou convergence. Le mouvement est la réponse à l'excavation où, dans le temps, les résultats du massif rocheux sont décroissants. Le mouvement est la conséquence de la redistribution de la contrainte » (Ladanyi et Gill, 1987).

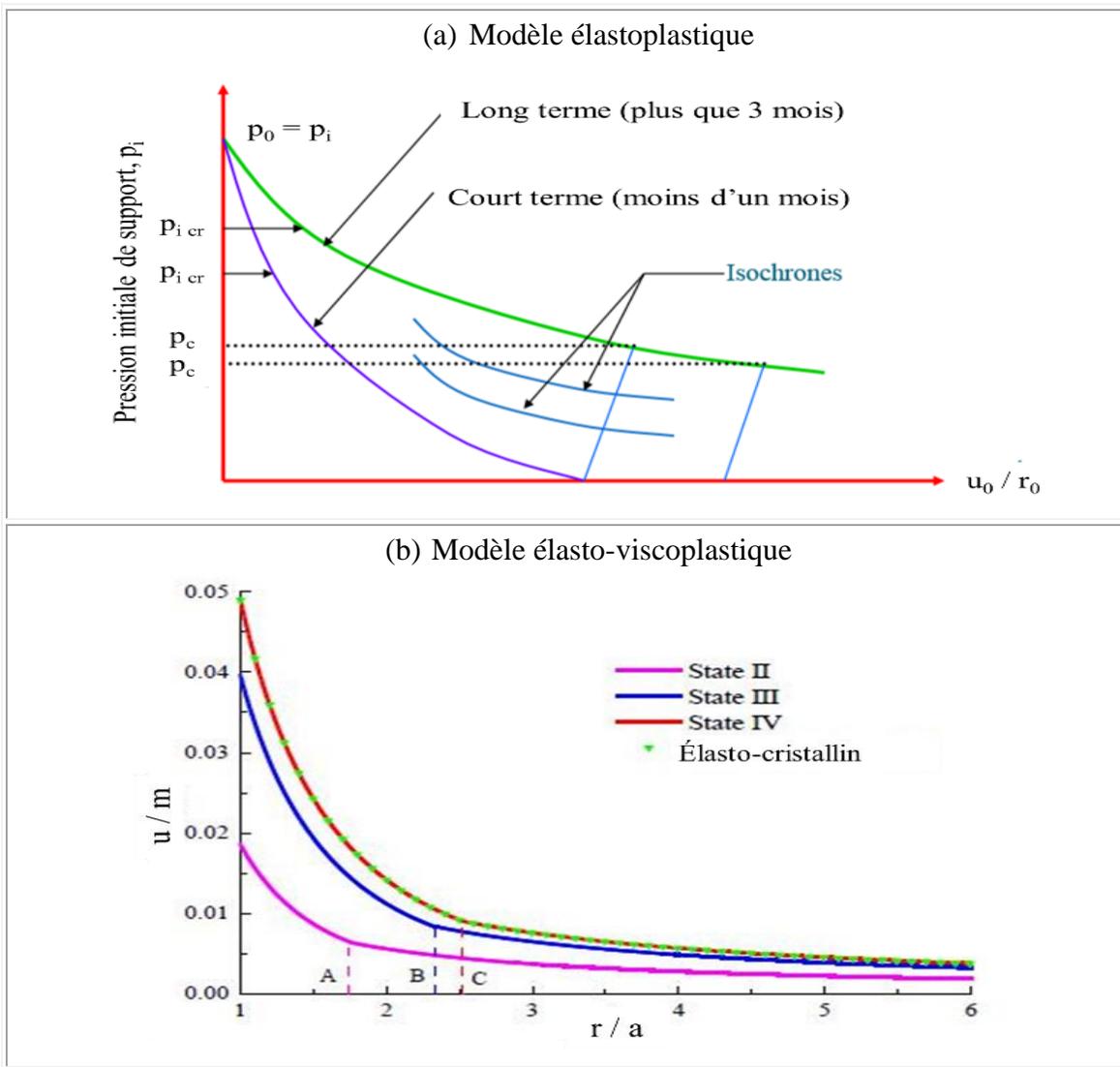


Figure 1.15 : Courbes caractéristiques de convergences de modèles de déformation différée de massif rocheux - Détermination de la pression selon le concept de résistance à long terme (Ladanyi et Gill, 1987).

La Figure 1.15 explique l'effet du long terme de la déformation du massif rocheux dû à la pression de revêtement qui est considéré à l'aide de différents concepts de limite ultime de la roche. Cela inclut le caractère conventionnel de ligne ou méthode de convergence-confinement, modifiée pour permettre de savoir le vieillissement du massif. Et pour savoir l'interaction revêtement-massif rocheux, des méthodes sont utilisées pour différencier les modèles linéaires viscoélastique ou élasto-viscoplastique. Les calculs de pressions sur le revêtement montrent que les valeurs enregistrées dans le court terme ont tendance à être sous-estimées par rapport au long terme.

Tableau 1.3 : Classement de la pression nécessaire pour provoquer la rupture de quelques roches par compression uniaxiale (AFTES, 1993 et Hoek-Brown, 2002)

Désignation	Exemples	$\sigma_c$ [MPa] <sup>25</sup>
<b>Roche de résistance très élevée</b>	Quartzites et basaltes	> <b>200</b> <sup>26</sup>
Roche de résistance élevée	<i>Granite très résistant; porphyre, grès et calcaire.</i>	[120, 200]
Roche de résistance élevée	Granite, grès et calcaire de très bonne tenue. Dolite, marbre, dolomie, conglomérat compact.	[60 , 120]
Roche de résistance moyenne	Grès ordinaires, schistes siliceux ou grès schisteux, gneiss.	[40 , 60]
Roche de résistance moyenne	Schistes argileux, grès et calcaire de moyenne résistance. Marne compacte, conglomérat peu consistant.	[20 , 40]

<sup>25</sup> L'unité est le MPa (1 MPa = 10<sup>6</sup> Pa = 1 N/m<sup>2</sup>).

<sup>26</sup> Dans le cadre de l'étude, les contraintes gravitationnelles ( $\sigma_c$ ) combinées estimées à 220 MPa et 280 MPa respectivement pour la roche intacte des galeries Mémé et Casséus de Terre Neuve. Lors des simulations, une valeur moyenne de 290 MPa > 200 MPa va être considérée (Cf. Chapitre 6).

Néanmoins, le Tableau 1.3 montre un exemple de classement de massif rocheux en fonction de la résistance en compression uniaxiale d'après l'Association Française des Tunnels et de l'Espace Souterrain (AFTES) qui pourrait favorablement nous aider dans nos calculs de design ou de réhabilitation du soutènement en béton. Des explications sur des concepts de soutènements <sup>27</sup> d'un revêtement en béton d'une galerie minière sont fort utiles pour la compréhension de l'étude.

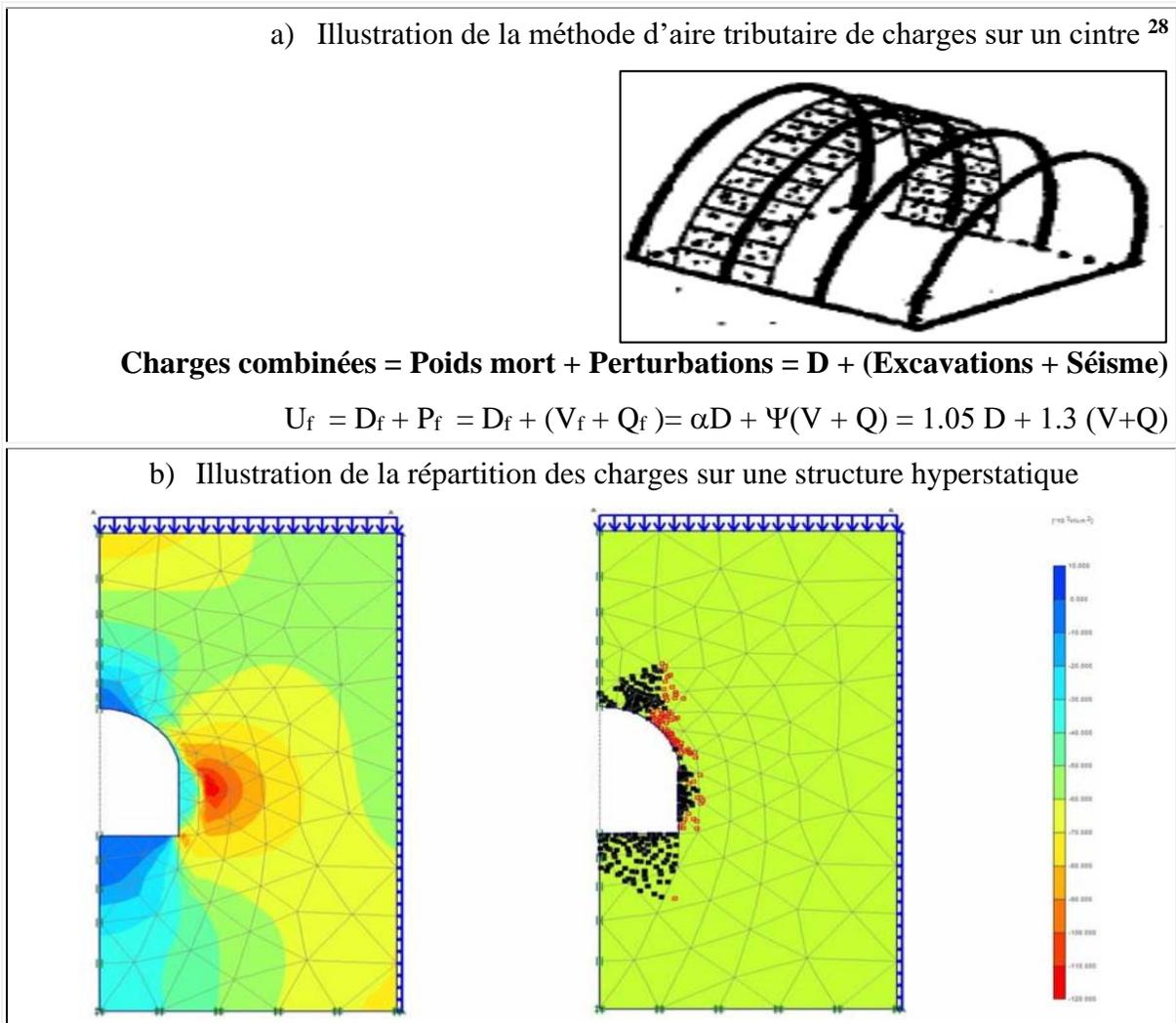


Figure 1.16 : Soutènement porteur de galeries souterraines - Charges réparties selon la méthode d'aire tributaire de charges sur une structure hyperstatique (Jha, 2000)

<sup>27</sup> Dispositif de soutien des parois d'une excavation soit par : - appuis (cadres, cintres, piles) - suspension (treillis métalliques, boulons).

<sup>28</sup> Cintre (arch): Cellule de soutènement dont la partie supérieure est courbe.

- Soutènement porteur (Voir Figure 1.16 pour des détails)

Ce concept consiste à déterminer le volume de roches (charges) susceptibles de tomber et à calculer le nécessaire pour supporter ce volume .

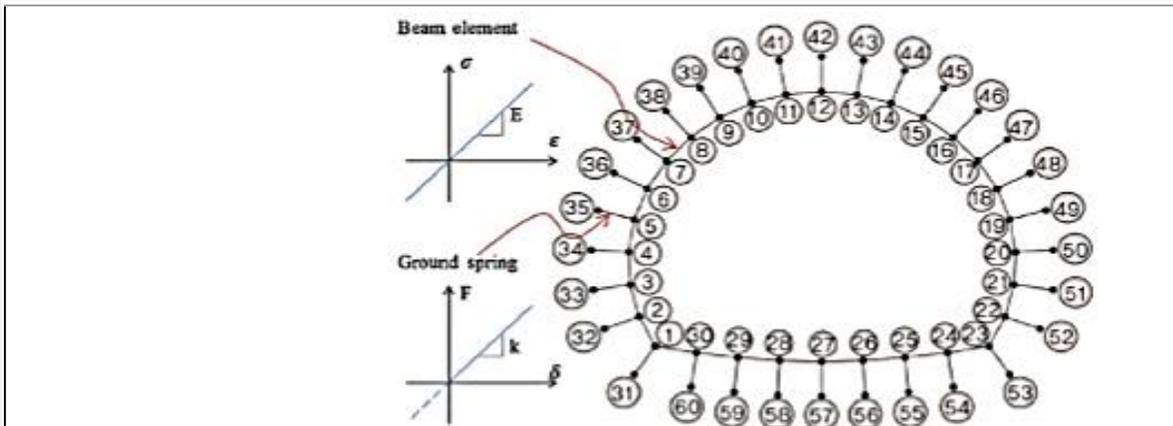


Figure 1. Typical beam-spring model

$$D_f = K d = (K_{\text{spring}} + K_{\text{ground}}) d \quad (\text{Winkler, 2016})$$

K : matrice de rigidité ou module de réaction

$D_f$  : vecteur charge morte ; d : vecteur déplacement

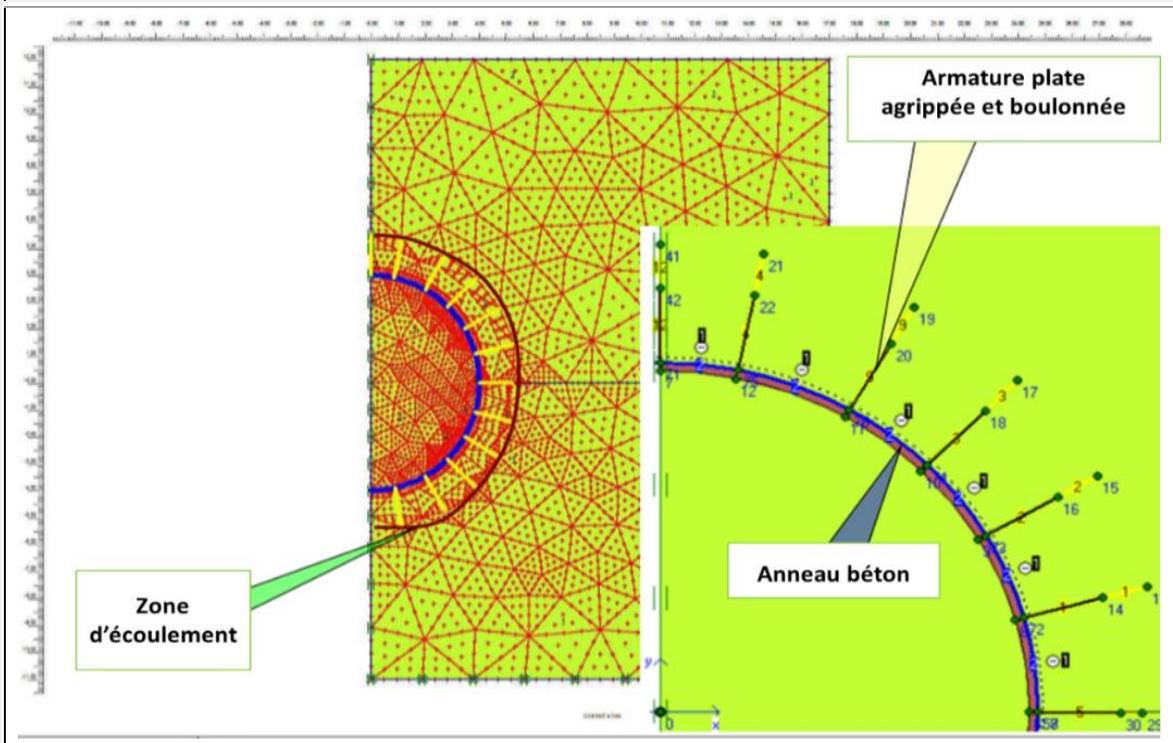


Figure 1.17 : Soutènements armant et confinant de galeries souterraines (Jha, 2000)

- Soutènement armant et confinant (Voir Figure 1.17 pour des détails)

« Le soutènement armant consiste à : « introduire dans le massif des éléments en acier (tels des boulons à ancrage réparti, à friction) ou en d'autres matériaux qui lutteront contre les cisaillements ou ouvertures de fissures » tandis que « Le soutènement confinant consiste à exercer sur le pourtour de l'excavation une pression de confinement afin que le terrain, même fracturé, soit rendu auto-portant » (Fine, 1998).

#### 1.6.4 Connaissances du concept de déplacement critique d'un tunnel

Sakurai (1983) proposa une relation reliant l'élongation critique au module de Young. Voir détails à la Figure 1.18. Le déplacement critique, supposant la déformation est uniforme, se calcule par la formule suivante :  $\delta_c = \varepsilon_c \cdot L_0$

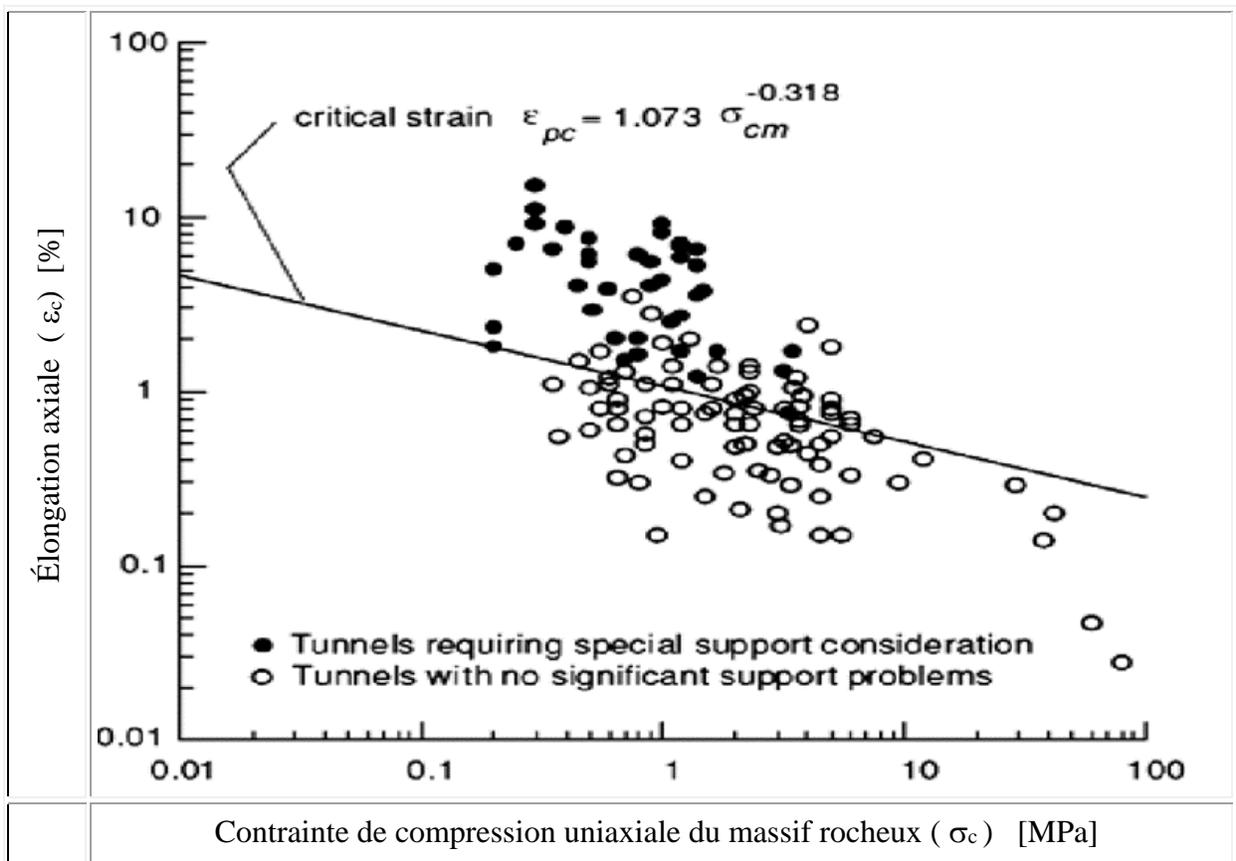


Figure 1.18 : Élongation pour différentes valeurs de résistance d'un massif rocheux. (Sakurai, 1983).

D'où :  $\varepsilon_c = \sigma_{cm} * J(t) = \sigma_{cm} / E(t)$  (2.20)

$\varepsilon_c$  : Élongation critique

$L_0$  : Longueur initiale du massif rocheux intact dans la direction étudiée

$E_m$  : Module de Young du massif rocheux

$\sigma_{cm}$  : Contrainte axiale de compression critique

$J(t) = 1 / E(t)$  : Module de complaisance du massif rocheux

Dans la littérature, il existe beaucoup d'approches sur la notion de déplacement parce que c'est un paramètre de grande importance et d'intérêt en géomécanique. Ce concept devient classique avec Brady et Brown (2013) dans le livre "*Rock mechanics for underground mining*", où le problème se posa aux fins de prédire ce qui pourrait arriver lors de l'excavation d'une mine aux fins d'extraction de minerais.

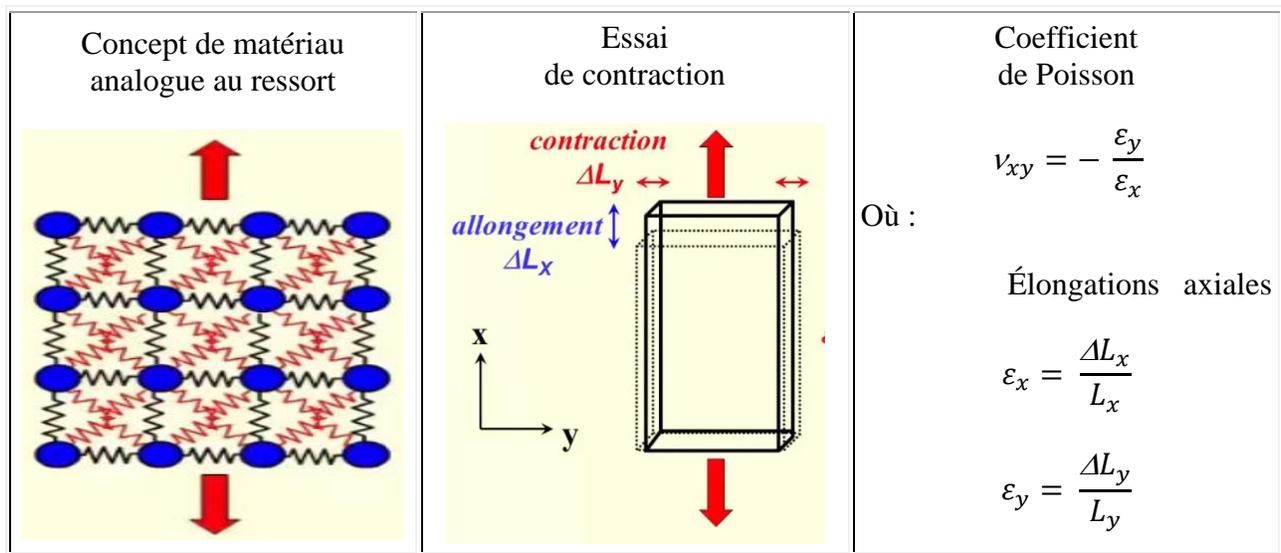


Figure 1.19 : Concept de déplacement critique d'un tunnel (Sakurai, 1983)

Voici les conditions qui ont été retenues pour une bonne exploitation :

- Les contraintes induites dans le massif rocheux lors d'une excavation ne doivent pas dépasser la capacité de résistance.
- Les déplacements résultant de toutes les contraintes induites dans le massif rocheux lors d'une excavation ne doivent pas dépasser le niveau de volume admissible. Voir Figure 1.19 pour des détails.

## 1.7 Synthèse

Un massif rocheux qui subit l'action de forces est soumis à un certain état de contraintes. Une surface isolée dans ce volume reçoit l'action d'un champ de forces. Ce champ de forces (pressions internes ou externes) qui déforme le massif rocheux est un champ de contraintes qui, dans le temps, produisent structurellement des plissements, des clivages, des joints et des failles quand ces contraintes sont supérieures à la résistance du massif. Selon le champ de forces, il se produit une compression, une extension ou un cisaillement . La déformation est indépendante de l'amplitude du déplacement. La prise en compte des contraintes initiales et leur mise en changement, ou non, constituera des aspects essentiels de la modélisation (par éléments finis ou différences finies) des massifs rocheux.

Le chargement de contraintes initiales peut également être utilisé pour simuler de manière approchée l'effet des phénomènes physiques (effet de pressions interstitielles, effet thermique ou dû au vieillissement). La méthode dénommée Convergence-Confinement (Figure 2.14) est illustrée sur un même graphique : a) la courbe caractéristique du terrain; b) la courbe de réaction du soutènement; c) La courbe de confinement et de déconfinement en fonction de la distance au front d'avancement <sup>29</sup>. Néanmoins, l'équilibre entre le terrain et le soutènement permet de mettre en évidence l'importance de la déformabilité des soutènements miniers qui doivent s'adapter aux déformations des terrains sans pouvoir vraiment s'opposer . Ce soutènement, autour de la galerie sous la forme d'un anneau circulaire, en D, elliptique ou fer-à-cheval, est en béton projeté munis de cintres et de boulons ancrés) doit être apte à supporter la poussée du massif rocheux. L'analyse dans leurs contextes (géologique et minéral) sera effectuée dans les prochains chapitres.

---

<sup>29</sup> Front d'avancement (active mine heading) : Partie plus étroite, excavée à l'avant d'un front de taille ou d'une galerie. Aussi le passage liant deux chantiers ou lieux de travail d'une mine souterraine.

## CHAPITRE 2

### CONTEXTES DE L'ÉTUDE DE CAS DE LA MINE SEDREN

Le site à l'étude (la mine Sedren) constitue la portion orientale d'un massif rocheux faillé de la région de Terre Neuve situé dans le département de l'Artibonite à Haïti. Deux principales galeries (Mémé et Casséus) sont construits par des exploitants (1960) donnant accès aux ressources minérales. Conséquemment, nous choisissons dans un premier temps de dresser le cadre géologique de la région d'étude et d'expliquer dans un second temps la pétrogenèse ou le mécanisme de formation minéralogique des gîtes<sup>30</sup> existants du site.

#### 2.1 La zone d'étude : Le domaine des Caraïbes

La Figure 2.1 montre la zone d'étude. L'encadré blanc indique Haïti dans la Figure 2.1.



Figure 2.1 : Situation géographique d'Haïti dans les Caraïbes. – Les taches en rouge constituent le domaine des Caraïbes. <http://www.tlfq.ulaval.ca/axl/amsudant/Antilles-map.htm>

<sup>30</sup> Gîtes minéraux (mineral deposits) : Formation géologique présentant une concentration en un ou plusieurs minéraux nettement supérieure à la moyenne terrestre.

Des contributions géologiques à l'échelle des Caraïbes sont dues à Buterlin (1990). Selon lui, dans le bassin des Caraïbes, nous retrouvons l'Arc des Grandes Antilles (Cuba, Haïti, la Dominique, la Jamaïque et Porto-Rico) et des Petites Antilles.

Tableau 2.1 : Origine de l'Archipel des Caraïbes  
(Adapté de Pindell et al., 2006)

PÉRIODE		ARCHIPEL CARAÏBES							Archipel
Âge (Ma)	Ère	Cuba	Hispaniola		Jamaïque	Porto-Rico	Îles Vierges	Tobago	Costa Rica
			Haïti	Dominc.					
90	Cambrien			V					+ V
		V	V	+					
						V			+
100	Cénoène	V	V						V
		V				V			
110	Albien			V					V
			V	+					
		X							
120	Aptien								
		+							
130	Néocène			+		V			
					V	V			
				+					
140	Néocène					+			
						+			
150	Jurassique				V	V			
Légende :			: Principalement océanique			V	: Composantes volcaniques		
			: Arc océanique			+	: Composantes intrusives		
			: Clastique			X	: Roches de résistance élevée		
			: Calcaire						

L'archipel des grandes îles, qui s'aligne suivant la direction Est-Ouest entre la presqu'île du Yucatan à l'Ouest, et l'extrémité septentrionale de l'Arc des Petites Antilles à l'Est, limite vers le Nord l'ensemble du domaine des Caraïbes (Figure 2.1).

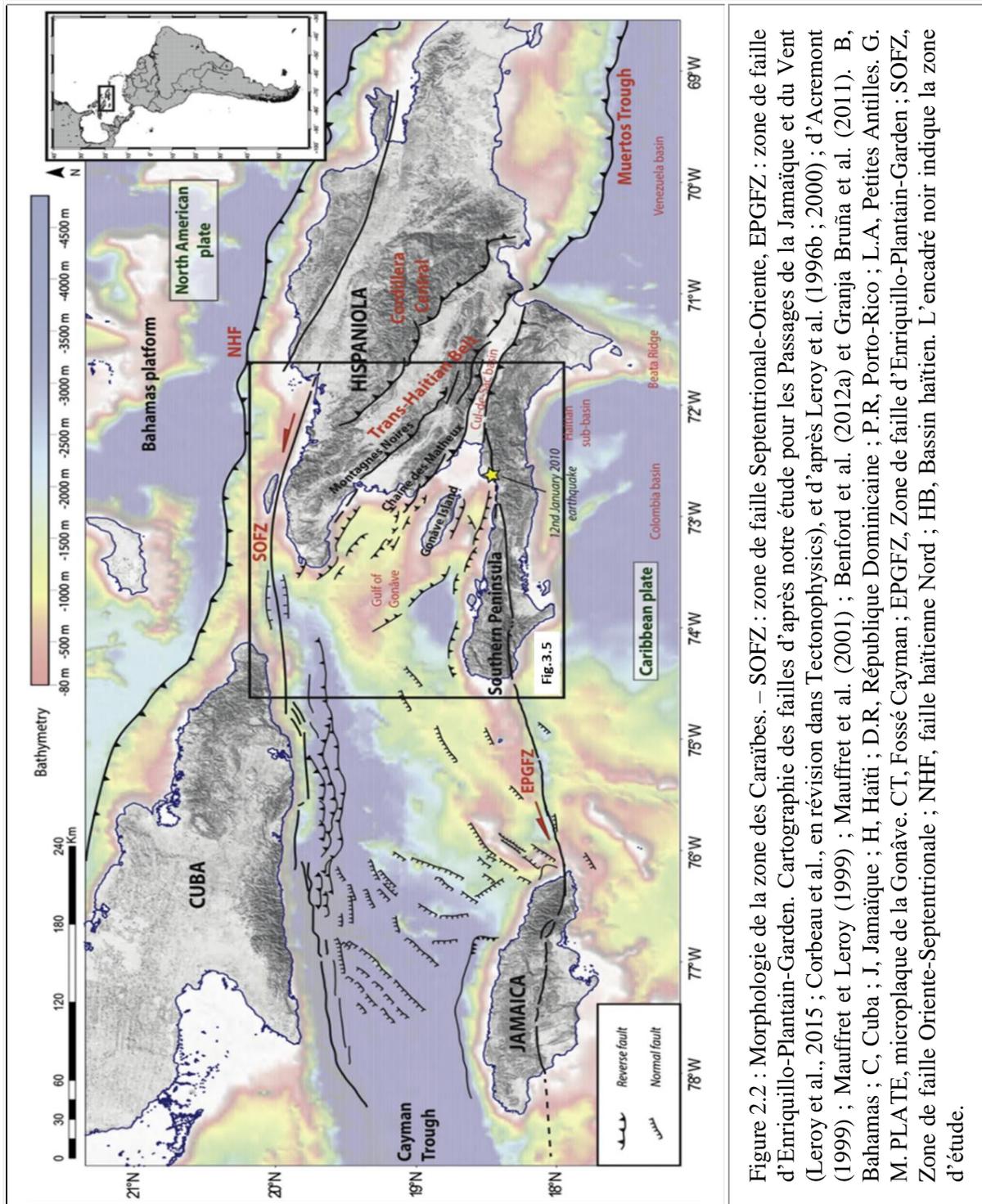


Figure 2.2 : Morphologie de la zone des Caraïbes. – SOFZ : zone de faille Septentrionale-Orientale, EPGFZ : zone de faille d'Enriquillo-Plantain-Garden. Cartographie des failles d'après notre étude pour les Passages de la Jamaïque et du Vent (Leroy et al., 2015 ; Corbeau et al., en révision dans Tectonophysics), et d'après Leroy et al. (1996b ; 2000) ; d'Acremont (1999) ; Mauffret et Leroy (1999) ; Mauffret et al. (2001) ; Benford et al. (2012a) et Granja Bruña et al. (2011). B, Bahamas ; C, Cuba ; J, Jamaïque ; H, Haïti ; D.R, République Dominicaine ; P.R, Porto-Rico ; L.A, Petites Antilles. G, M. PLATE, microplaque de la Gonave. CT, Fossé Cayman ; EPGFZ, Zone de faille d'Enriquillo-Plantain-Garden ; SOFZ, Zone de faille Oriente-Septentrionale ; NHF, faille haïtienne Nord ; HB, Bassin haïtien. L'encadré noir indique la zone d'étude.

## 2.2 La région d'étude : La presqu'île d'Haïti

La presqu'île d'Haïti occupe la partie occidentale de l'île Hispaniola. La République d'Haïti est séparée de la République Dominicaine par une frontière globalement Nord-Sud (Figure 2.3). La chaîne plissée Trans-Haïtienne, située à l'extrémité Est de la marge passive Nord Jamaïque, est localisée dans la continuité de la marge extensive Est du système Cayman (Figure 2.2). Elle est située à la frontière entre les plaques Amérique du Nord et Caraïbe. La frontière de la plaque Caraïbe Nord est une région en collision oblique qui sépare la plaque Amérique Nord de la plaque des Caraïbes (Figure 2.3).

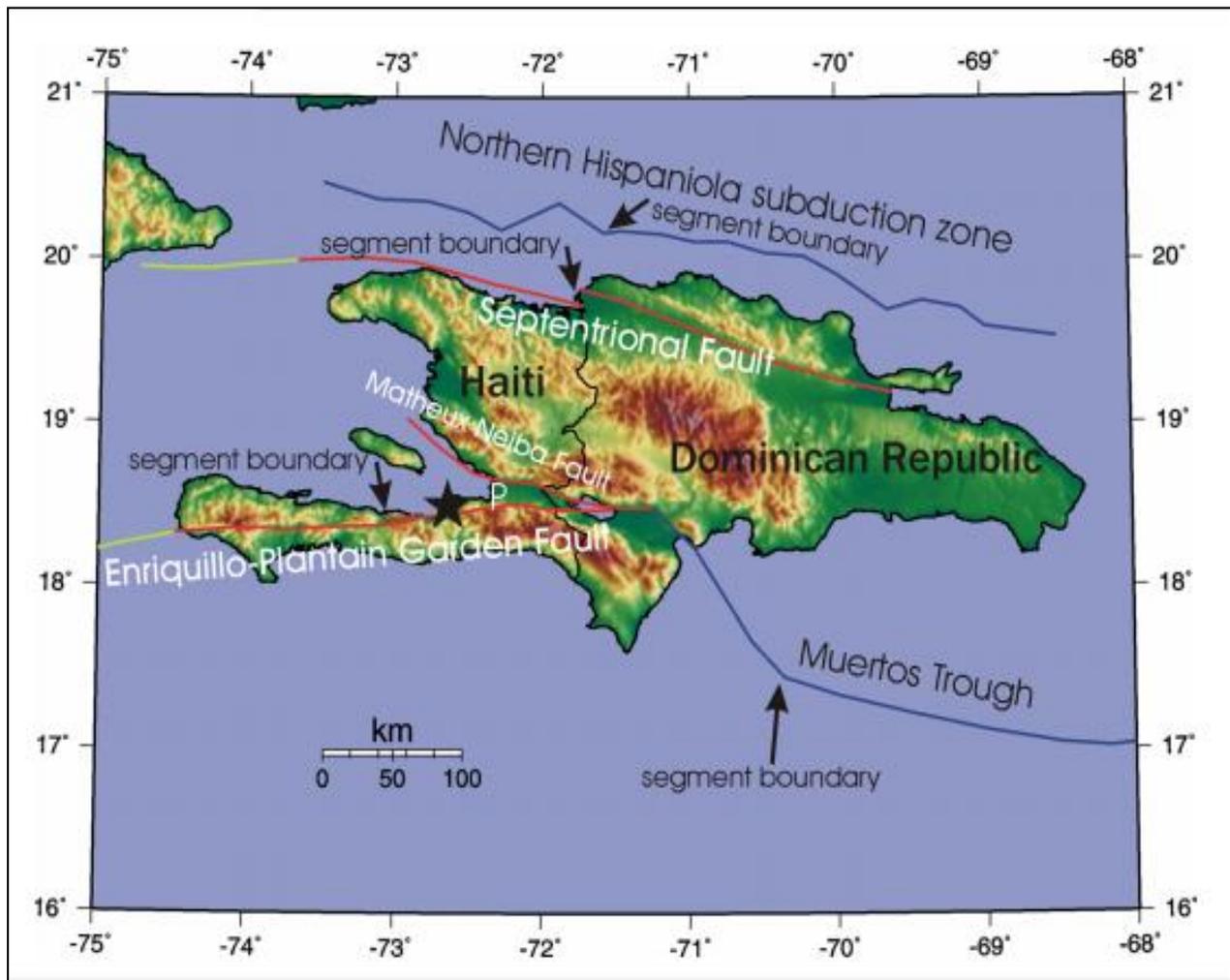


Figure 2.3 : Localisation des principales failles géologiques de l'île Hispaniola (BME, 2017).

## 2.2.1 Topographie de la presqu'île d'Haïti

La topographie de la presqu'île d'Haïti est accentuée. Elle est caractérisée par la plaine et la vallée du haut de l'Artibonite qui s'étendent en direction Nord-Ouest / Sud-Est à Ouest – Nord-Ouest / Est – Sud-Est, entre la chaîne des Matheux au Sud, les Montagnes Noires, le massif de Terre-Neuve au Nord et le golfe de la Gonâve à l'Ouest. La cartographie révèle un grand système de failles décrochantes senestres pour les Passages de la Jamaïque et du Vent (Figure 2.4).

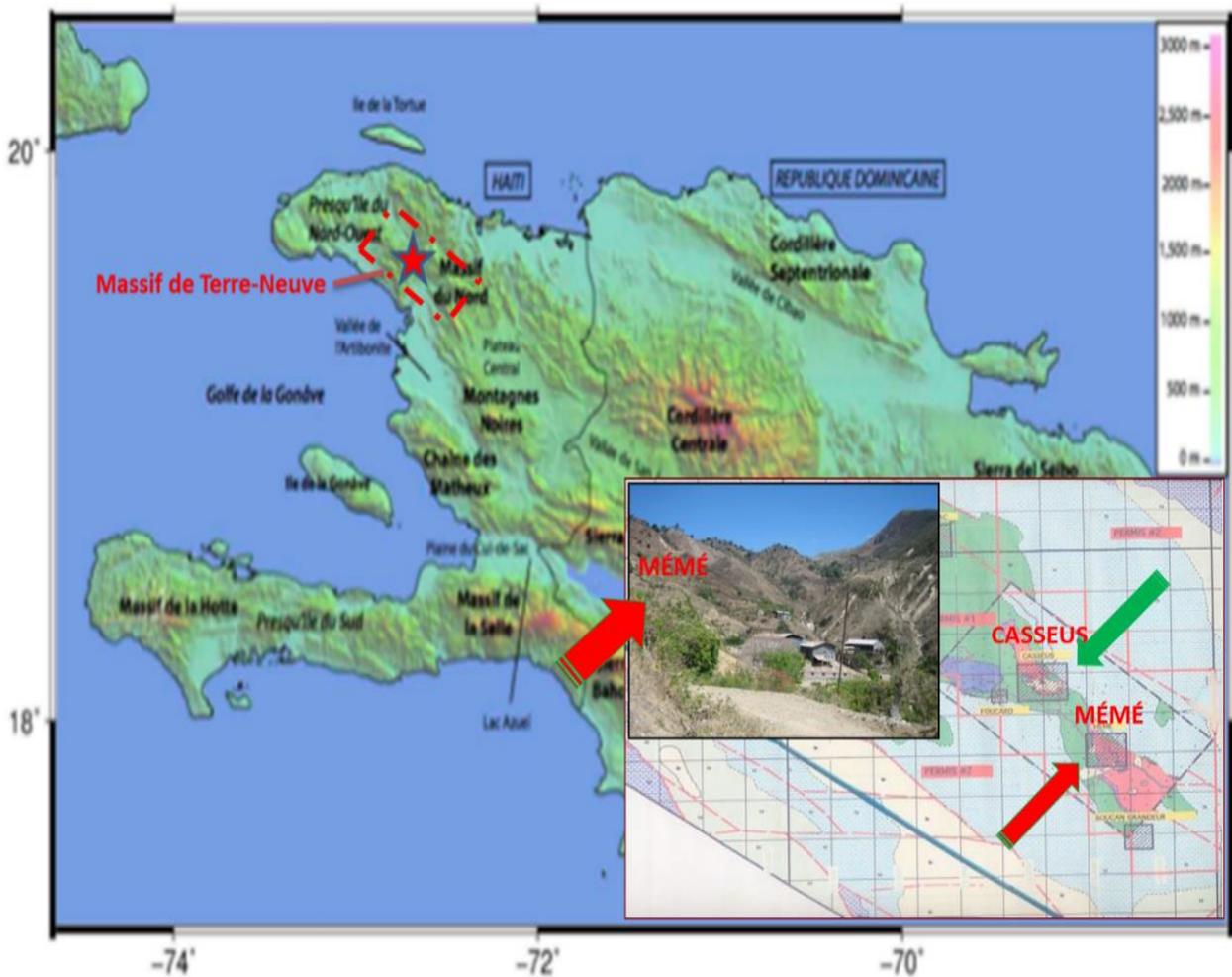


Figure 2.4 : Topographie régionale de la presqu'île d'Haïti (BME, 2017). L'épaisseur crustale de la terre ferme a été numérisée grâce à une étude de fonctions récepteurs. La croûte imagée est épaisse d'environ 23 km au Nord d'Haïti, d'environ 22 km au Sud et d'environ 41 km au centre, délimitant ainsi trois grands domaines différents.

Plusieurs études géologiques proposent que ces ensembles géologiques distincts correspondent à des domaines composés respectivement de l'arc volcanique Crétacé des Grandes Antilles au Nord, du plateau océanique Caraïbe au Sud, et d'une croûte continentale au centre (Figure 2.4).

### 2.2.2 Géologie, morphologie et pétrologie de la presqu'île d'Haïti

Les premiers travaux importants concernant la géologie d'Haïti sont ceux de Buterlin (1990). Celui-ci a précisé la stratigraphie des différents ensembles sédimentaires et publié la première carte géologique à l'échelle du 1 / 250 000. Ces travaux ont été précisés et affinés par les études de Cheilletz et al. (1982), Calmus et al. (1983) pour ne citer que ceux-là.

La carte géologique d'Haïti (Figure A.1 à l'Annexe A) permet de distinguer deux grandes périodes géologiques séparées par une discordance majeure au Paléocène (Boisson, 1987). La première période se retrouve principalement dans la Presqu'île du Sud, où un substratum a été identifié (en violet, au Sud de la Figure A.1 à l'Annexe A) sur lequel se superpose anormalement une série sédimentaire du Crétacé supérieur (Calmus, 1983 ; en vert, partie Sud de la Figure A.1 à l'Annexe A). Ces formations associées à la première période géologique affleurent également dans le Massif du Nord et dans la Presqu'île du Nord-Ouest, avec l'occurrence de faciès magmatiques d'arc d'âge Crétacé (Boisson, 1987; en rose et vert, partie Nord de la Figure A.1 à l'Annexe A). La première période se retrouve après la discordance du Paléocène. Une sédimentation calcaire s'installe, à l'Eocène, sur l'ensemble d'Haïti (en orange, Figure A.1 à l'Annexe A). Un épisode volcanique alcalin a cependant lieu à l'Eocène inférieur (en violet foncé, au Nord de la Figure A.1 à l'Annexe A), et affleure principalement dans les Montagnes Noires (Buterlin, 1960). Le soulèvement d'Hispaniola est marqué au Plio-Quaternaire par le développement de terrasses récifales dans la Presqu'île du Nord-Ouest (en gris foncé, Figure A.1 à l'Annexe A) et plus généralement par une sédimentation détritique depuis la fin du Miocène (en jaune, Figure A.1 à l'Annexe A).

Les Figures 2.5 et 2.6 illustrent les différents types de minéraux rencontrés lors de l'exploration.

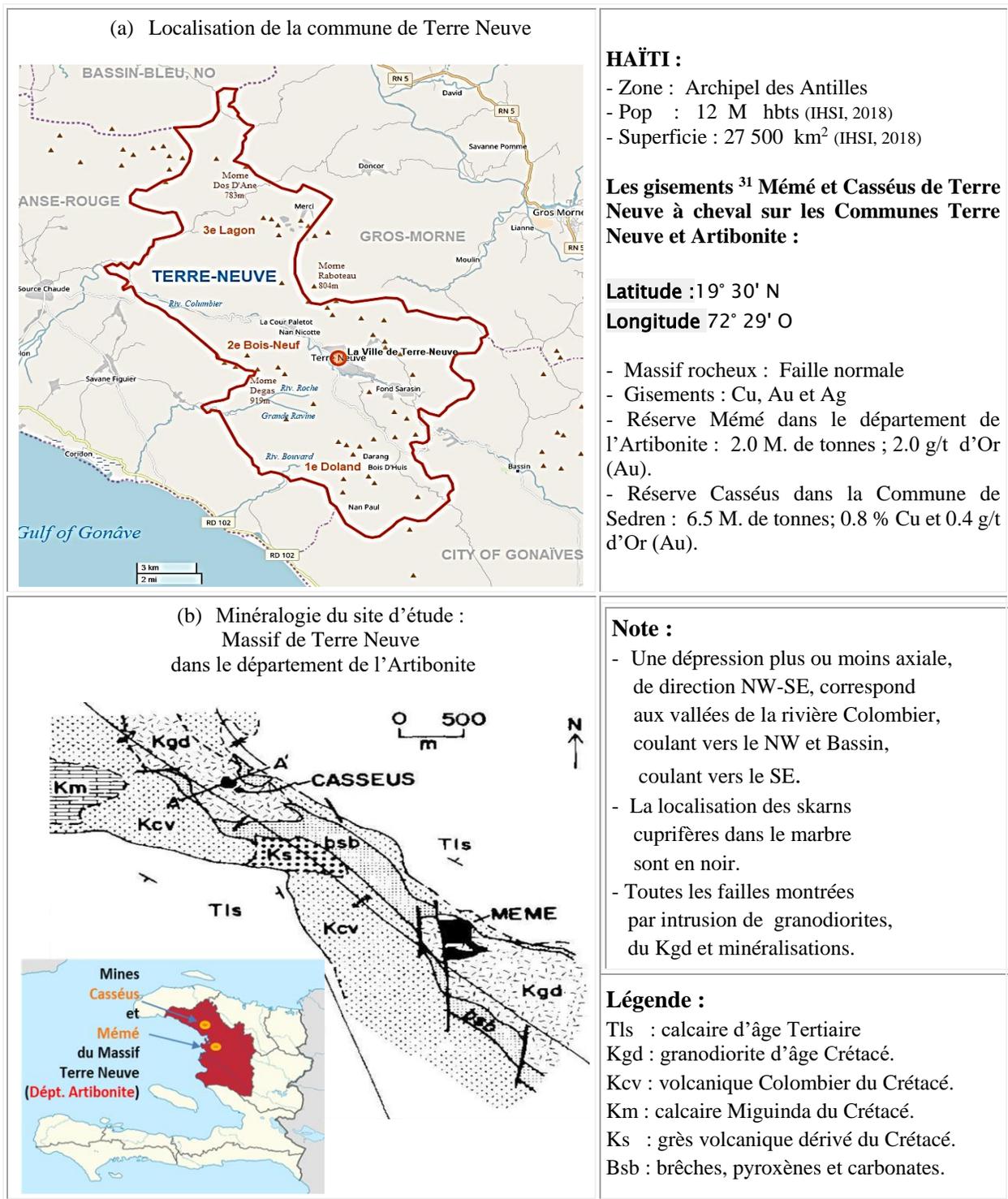


Figure 2.5 : Localisation des minéraux du site / Terre Neuve / Haïti (Harnish, 1986)

<sup>31</sup> Gisement (ore body): Zone minéralisée suffisamment importante pour que l'on puisse en envisager l'exploitation.

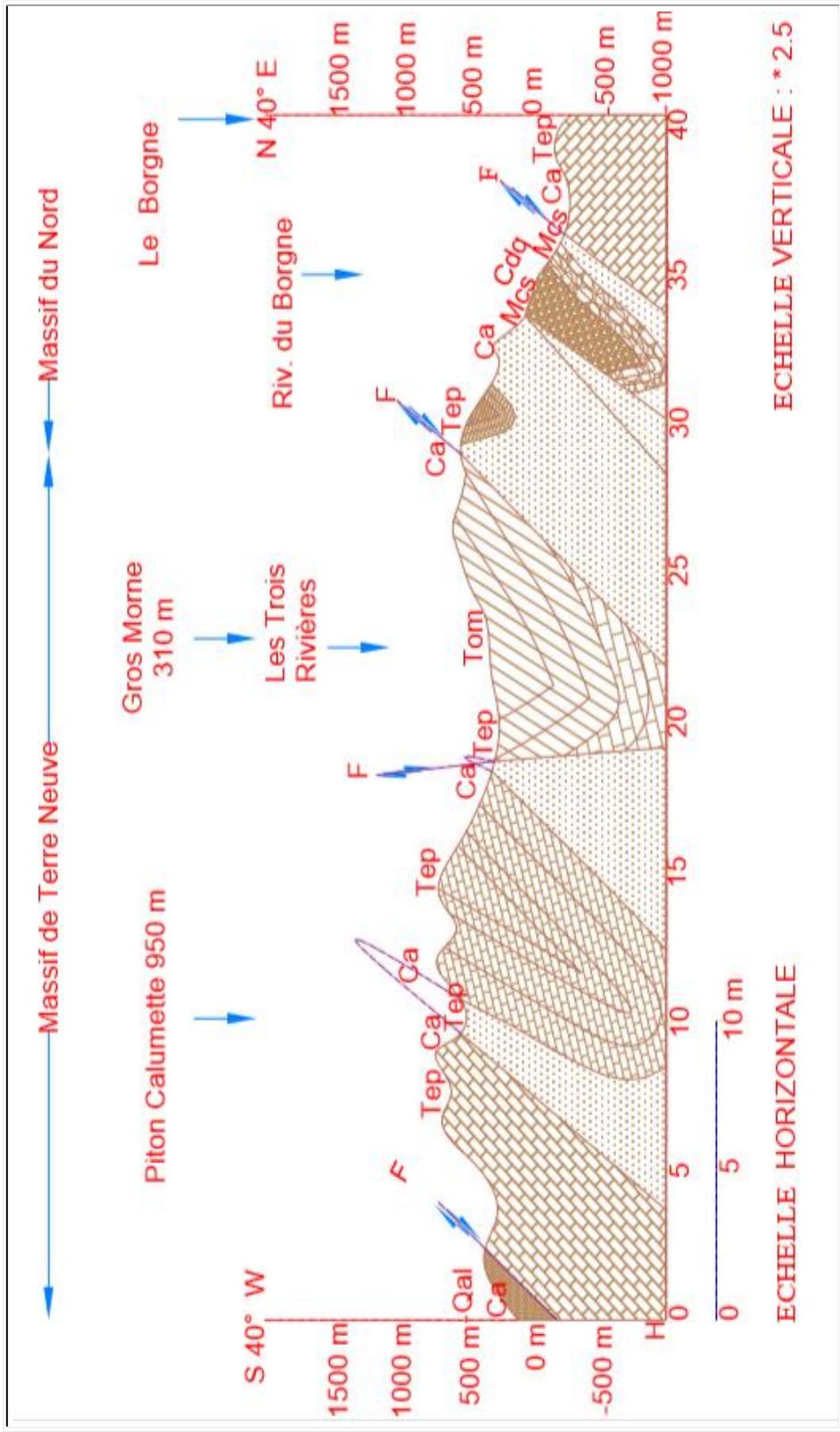


Figure 2.6 : Coupe géologique à travers la partie SE de la presqu'île du Nord-Ouest et la partie NW du massif du Nord. Qal : alluvions (Quaternaire). — Tom : formation La Crête : calcaires impurs et calcaires madréporiques (Oligo-Miocène). — Tep : roches détritiques (base), calcaires cristallins massifs et calcaires crayeux, bien lités (Paléocène et Eocène). — Mcs : formation Trois-Rivières (argiles schisteuses, conglomérats, calcaires à Rudistes). — Cdq : diorites quartzifères (Crétacé supérieur). — Ca : andésites (Crétacé). (Adapté de Buterlin, 1958, Sodemine 2018)

## 2.3 Le site : le massif Terre Neuve dans le département de l'Artibonite

C'est une chaîne escarpée de 1 100 mètres d'altitude au morne Goreille, point culminant de toute la presqu'île. Une dépression plus ou moins axiale, de direction NW-SE, correspond aux vallées de la rivière Colombier, coulant vers le NW et Bassin, coulant vers le SE. Voir Figure 2.7 pour des détails sur l'unité morphostructurale du massif de Terre Neuve.

### 2.3.1 Géologie, minéralogie et morphologie de Terre Neuve

La géologie de la région de Terre Neuve fait partie d'un domaine qui occupe plus du tiers de la péninsule du Nord-Ouest d'Haïti et qui s'étend globalement du secteur de Jean Rabel jusqu'au Nord des Gonaïves. Les flancs des montagnes et vallées sont abrupts. La topographie témoigne d'une érosion rapide. Les points de basse altitude du site à l'étude ont une élévation d'environ 200 mètres au-dessus du niveau de la mer. Ils se situent dans les secteurs de Bassin et de Savane Longue. Les crêtes culminantes se retrouvent de part et d'autre de la vallée de la rivière Colombier (vallée de Terre Neuve) où plusieurs cimes ont une élévation qui varie de 1 000 à 1 100 mètres au-dessus du niveau de la mer. L'élévation moyenne est de l'ordre de 500 à 600 mètres au-dessus du niveau de la mer. Le golfe de la Gonâve est à 6 kilomètres de la bordure de la galerie Casséus. Le dénivelé entre les crêtes et le creux des vallées est de l'ordre de 250 à 400 mètres. Le principal axe de drainage est la rivière Colombier qui s'écoule vers le Nord-Ouest pour ensuite s'orienter vers le Sud-Ouest et se jeter dans le golfe de la Gonâve.

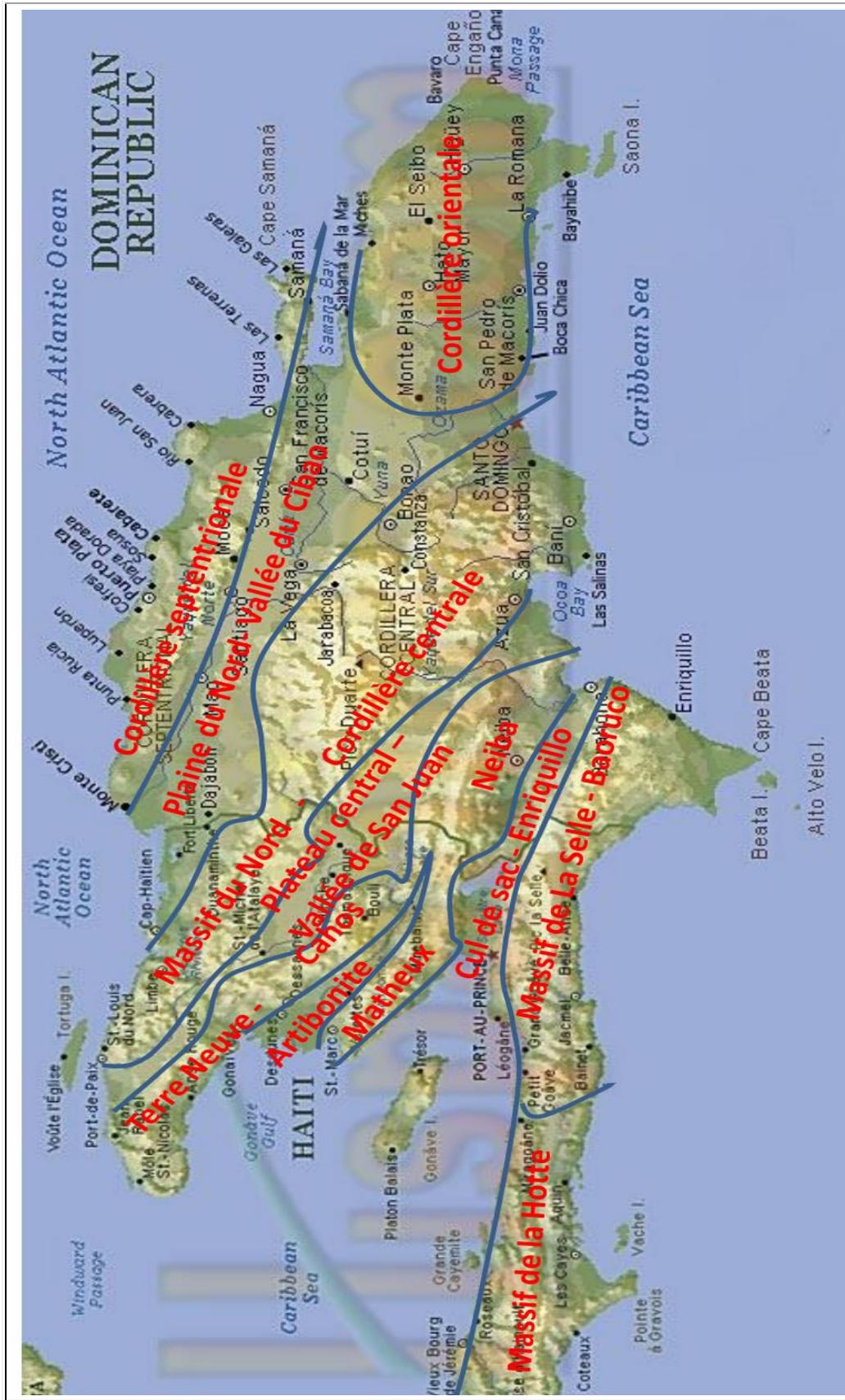


Figure 2.7 : Carte des principales unités morphostructurales de l'île d'Hispaniola - Différents ensembles géographiques façonnent le paysage, avec du Nord-Est au Sud-Ouest : – la Cordillère Septentrionale, séparée du reste de l'île par la Vallée de Cibao ; – l'île de la Tortue et la Presqu'île du Nord-Ouest côté Haïtien, et la Sierra de Seibo côté Dominicain ; – le Massif du Nord et la Cordillère Centrale, qui coupent obliquement l'île d'Hispaniola en deux ; – le Plateau Central et la Vallée de San Juan ; – les Montagnes Noires et la chaîne des Matheux, séparées en Haïti par la vallée de l'Artibonite, et la Sierra de Neiba en République Dominicaine. (BRGM/BEICIP/BME, 1988 et Boisson, 1987).

À Terre Neuve, la couche de base du massif rocheux d'âge Cambrien est constituée en majeure partie de roches volcaniques de la formation du Colombier (andésites porphyriques<sup>32</sup> de couleur grise à pourpre, basaltes, sédiments volcanogènes, brèches, tufs, pyroxènes et carbonates) et, en proportion moindre, des calcaires de la formation du morne Miguinda à l'Est. Cette couche volcanique est partiellement recouverte par calcaires cristallins massifs Cénozoïque d'âge Tertiaire et calcaires crayeux, bien lités (Paléocène et Eocène) et des alluvions (gravier, sable, et argile schisteuse) du Quaternaire près de la côte (Kesler, 1966). Le tout est recoupé par des intrusions felsiques (granodiorites, diorites quartziques, tonalites, monzonites quartziques) et mafiques (gabbro). Les intrusions felsiques sont plus abondantes que celles des mafiques. La formation du Miguinda est principalement composée de calcaires, de lits, de grès fin et de siltites. Les calcaires de Miguinda ainsi que leurs équivalents, métamorphosés en marbre et en zone de skarn par la venue des roches intrusives, forment des blocs ou des lambeaux séparés les uns des autres. De façon générale, les skarns connus sont distribués à l'intérieur d'un couloir relativement étroit et linéaire.

La carte de la région de Terre Neuve (Brown et Burbank, 1923) donne un point de vue géologique différent. Cette carte, élaborée à partir d'observations sur le terrain, propose que les roches volcaniques d'âge Tertiaire soient du Crétacé de la même formation du Colombier. Cette interprétation ferait augmenter la superficie exposée des roches d'âge Crétacé. L'approche adoptée pour la distinction des terrains qui constituent le sous-sol haïtien suit l'échelle stratigraphique internationale tout en faisant référence aux formations lithostratigraphiques (Tableau 3.2) décrites dans la littérature.

---

<sup>32</sup> Les porphyres, dans les andésites, sont composés de feldspaths, de pyroxène ou d'amphibole.

Tableau 2.2 : Log chronostatigraphique du massif rocheux de Terre Neuve <sup>33</sup>  
(BME, 1988 et Sodemine, 2018)

ÉCHELLE CHRONOSTRATIGRAPHIQUE (M.A.)				FORMATIONS STRATIGRAPHIQUES	
20 _ 5.1 _ 24.6 _ 38.0 _ 54.9 _ 65.0 _ 97.5 _ 144.0 _	CENOZOÏQUE	NEOGENE	PLIOCENE	Alluvions récentes	
			MIOCENE	Sup.	Alluvions anciennes
				Moy.	Calcaires récifaux, côtiers
	Inf.	Roches détritiques			
	PALEOGENE	OLIGOCENE	Formation de la Crête : 500 m Calcaires jaunes, impurs sableux		
			EOCENE	Sup.	Calcaires cristallins (partie sud-centrale du massif)
		Moy.		Calcaires massifs et calcaires crayeux à silex Microdiorites quartzifères	
		Inf.			
		PALEOCENE	Tufs et larves basaltiques Calcaires massifs et calcaires crayeux		
	MESOZOÏQUE	CRETACE	SUPERIEUR	SENONNIEN	Calcaires impurs Conglomérats, grès, argiles impures
Diorites quartzifères (partie Est du massif) Andésites (partie Nord-Ouest) Calcaires schisteux (majeure partie du massif)					
INFÉRIEUR			NEO COMMIEN	Basaltes Roches métamorphiques (parties Est et Centre) Roches épizonales (parties Est et Centre)	
				Micaschistes et schistes (en galets)	

<sup>33</sup> Voir Rapport synthèse des travaux et activités de reconnaissance à l'Annexe D.

### 2.3.2 Les anomalies du massif rocheux de Terre Neuve

Une démarche d'observations, de reconnaissances géomécaniques des lieux accompagnée de suivi de contrôle de terrains et de prélèvements d'échantillons. Conformément aux hypothèses, normes et critères, cette démarche (2015-2018) a été entreprise auprès des intervenants responsables, des acteurs et parties prenantes à des fins de connaître l'état des lieux.

Ces travaux et activités de prospection visent à mieux définir la géologie de la région de Terre Neuve et à anticiper la présence de zones minéralisées d'importance qui ne sont pas perceptibles ou qui sont peu visibles en surface. Ces travaux, orientés surtout vers le terrain, ont pour objectif de valider d'anciennes données et d'acquérir de nouvelles données géologiques, géochimiques, géophysiques et métallogéniques sur la région afin de préciser le potentiel minéral.

Des détails à l'Annexe D sont les suivants :

- a) La cartographie, l'échantillonnage de la zone et la localisation du réseau de lignes couvrant les roches d'âge Crétacé de la vallée de Terre Neuve où longe la rivière Colombier.
- b) La description du levé géophysique hélicoptéré des anomalies du site à l'étude.
- c) La description du levé géochimique couvrant les roches d'âge Crétacé.
- d) La description du levé radiométrique au sol couvrant la superficie du réseau de lignes.

### 2.3.3 Les gisements de Mémé et Casséus du massif de Terre Neuve

Le massif rocheux de Terre Neuve est une mine constituée de roches dures (granite, basalte, évaporites etc.) dont la profondeur ne dépasse pas les 1100 mètres.

Nous observons l'intensité des déformations et des bouleversements que le massif rocheux a subis, la complexité de l'histoire géologique et la richesse de son potentiel en ressources minérales. Les gisements, en forme d'Arc, ont une grande variété de roches sédimentaires et éruptives. Voir Figure 2.8 pour des détails.

a) Localisation des gisements Mémé et Casséus (Sodemine, 2018)



b) Coupe géologique du secteur Mémé et profil de l'ouvrage (adit principal) illustrant la concentration d'or sous du marbre. (Kesler, 1966)

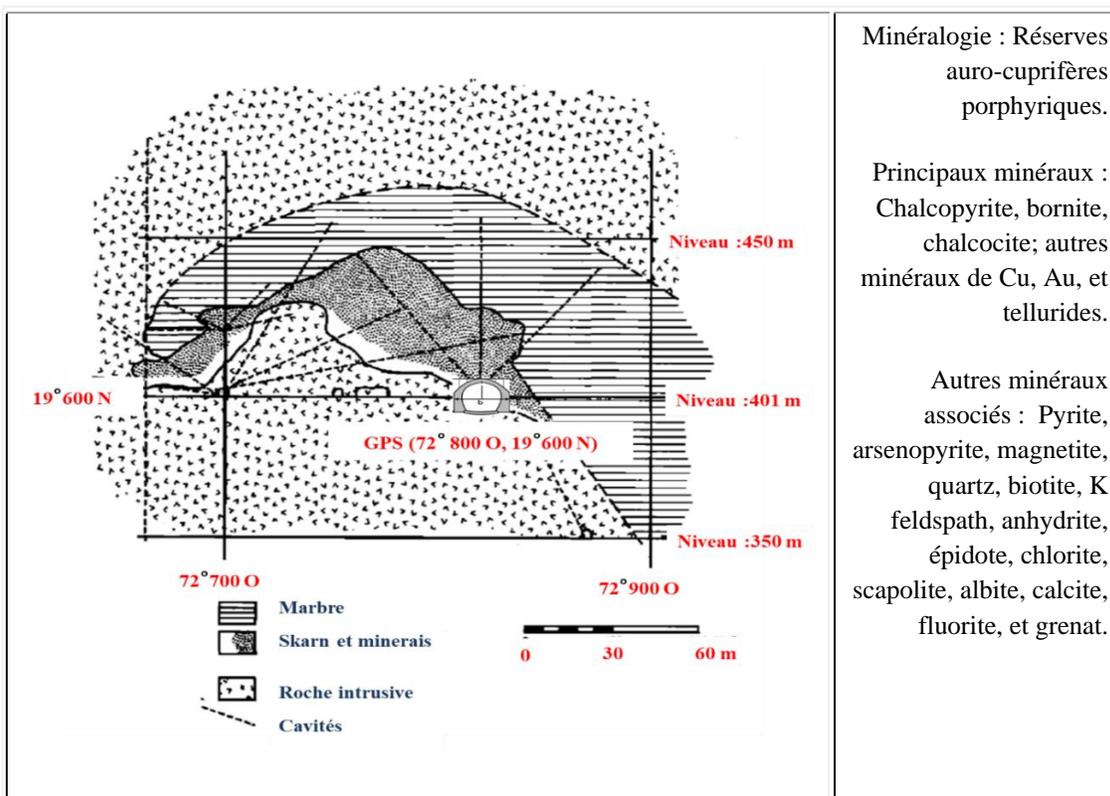


Figure 2.8 : Les gisements de Mémé et Casséus du massif de Terre Neuve / Haïti (Kesler, 1966 et Sodemine 2018)

En 1955, la Sedren S.A. entreprend des sondages et découvre des terrains houillers productifs sur le banc de la commune de Terre Neuve. La Compagnie Sedren est constituée en 1960 pour exploiter le gisement.

- De 1960 à 1971, environ 1.5 million de tonnes de minerai à 2% de cuivre ont été extraites. Des travaux de prospection assez détaillés ont été effectués par la Sedren S.A. tant à l'intérieur qu'à l'extérieur de la concession.
- Au départ de la Société en 1971, en raison de la chute du prix du cuivre sur le marché international, les installations de surface et souterraines sont restées sur place et la Banque Nationale de la République d'Haïti en assura le gardiennage et l'entretien.
- En 1981, un groupe japonais Toyoda Tsusho Kaisha effectua des travaux de prospection dans la région de Terre-Neuve. Les résultats de ces travaux n'ont pas été publiés.
- En 1982, une compagnie américaine, la First City Development of Haïti S.A. obtint du gouvernement haïtien un permis de prospection et une concession pour la réouverture de la mine.
- De 1982 à 1989, bien que le contrat fût résilié par l'État haïtien en 1983, la Compagnie s'est maintenue sur place en procédant au nettoyage des installations existantes sans effectuer une étude de faisabilité du gisement.
- En septembre 1989, le Bureau des Mines et de l'Énergie (BME) arrêta les opérations de la Compagnie en faisant poser des scellés sur les installations de la mine.

#### 2.4 Pétrologie des roches encaissantes

Au centre de l'anticlinal <sup>34</sup> du massif de Terre Neuve, on en retrouve des dépôts similaires de forme cylindrique (1.5 de longueur x 2 km diamètre) .

---

<sup>34</sup> Anticlinal (anticline): Plis géologiques où les éléments situés à l'intérieur de la courbure étaient, avant la déformation, les plus bas.

Tableau 2.3 : Indices d'altération des roches de la région de Terre Neuve

INDICES D'ALTÉRATION DE L'ÉCHANTILLONNAGE DES ROCHES				Remarque
TYPES DE ROCHES	Altération Faible	Altération modérée	Altération Intense	
Volcaniques non différenciées	100	102	104	
Andésite	110	112	114	
Andésite pourpre à grise à porphyres de feldspath	120	122	124	
Andésite pourpre à grise à porphyres de feldspath et de pyroxène	130	132	134	
Andésite pourpre à grise à porphyres de pyroxène	140	142	144	
Basalte	150	152	154	
Sédiments volcaniques	160	162	164	
Assemblage volcaniques / intrusives	200	202	204	
Volcaniques non différenciées	300	302	304	
Diorite, granodiorite, quartz monzonite etc.	310	312	314	
Porphyres à feldspath (+/- quartz)	320	322	324	
Porphyres cuprifère	330	332	334	
Gabbro	350	N / A	N / A	
Ultramafiques, pyroxénite	340	N / A	N / A	
Assemblage intrusive felsique-skarn	390	N / A	N / A	
Skarn non-différencié	400	N / A	N / A	
Skarn calco-silicaté	400	N / A	N / A	
Skarn calco-silicaté	420	N / A	N / A	
Skarn non-différencié	430	N / A	N / A	
Skarn calco-silicaté	440	N / A	N / A	
Marbre	450	N / A	N / A	
Calcaire	500	N / A	N / A	
Divers (brèches, veines de quartz, etc.)	1000	N / A	N / A	

**Note :** Échantillonnage et validation des données réalisés par Valentino Nelson et J. W. Colas pour les comptes de SODEMINE (2018). La valeur absente se note par N / A.

Le minerai prélevé le plus souvent dans les roches encaissantes est l'assemblage intrusif felsique-skarn arrangé dans une composition de quartz monzonite à tonalites. Le Tableau 2.3 dresse la pétrographie des différents indices d'altérations de plusieurs types de roches prélevés lors de l'exploration de la région.

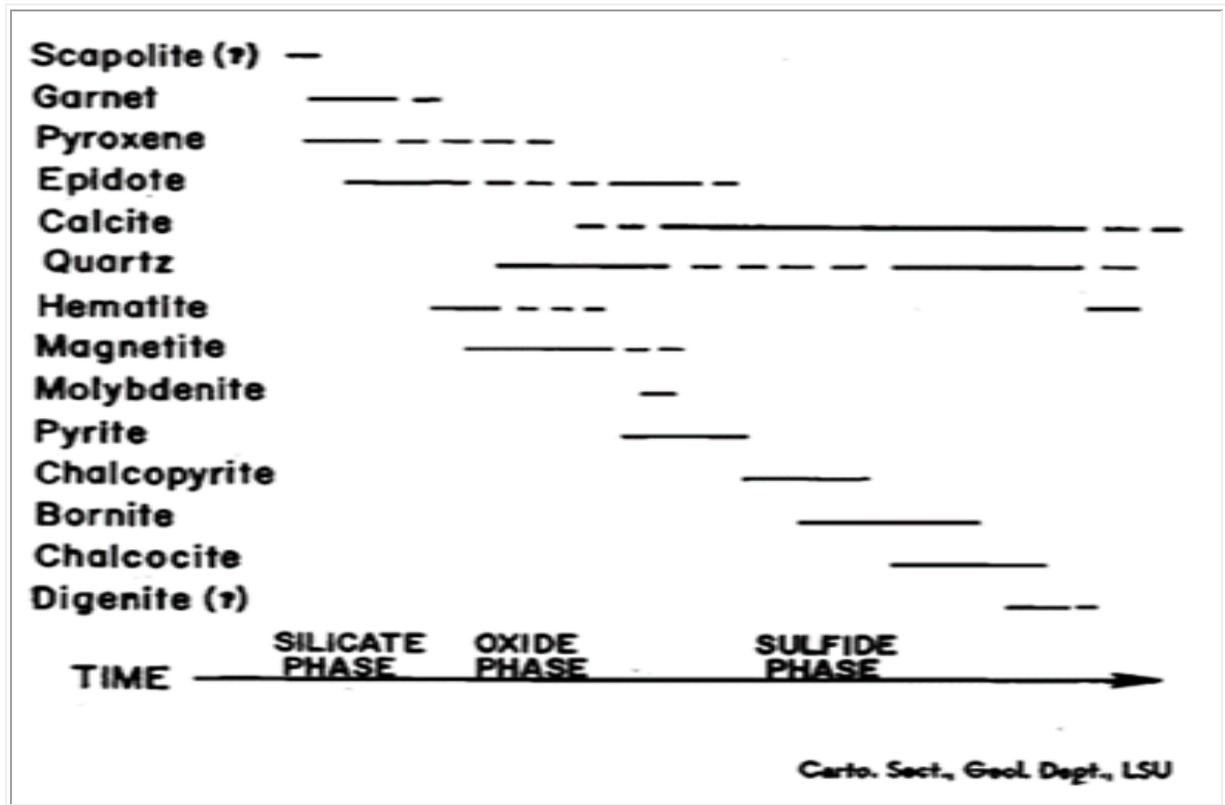


Figure 2.9 : Phases de minéralisation d'un modèle skarn de type porphyre cuprifère et autres minéraux de la mine Sedren (Cité dans Kesler, 1966)

Le gisement de Sedren contient les minéraux suivants : chalcopyrite, bonite, chalcocite, tennantite, autres minéraux de type auro-cuprifère de contact, électrum, et tellurides; des minéraux associés à la pyrite, arsénopyrite, magnétite, quartz, biotite, K feldspath, anhydrite, épidote, chlorite, scapolite, albite, calcite, fluorite, et grenat. Le cuivre et l'or se trouvent en quantité importante. Le cuivre est habituellement de faciès porphyrique.

Dans les veines de quartz, le cuivre est sous la forme de chalcopyrite. L'or est associé à la chlorite; il varie et ses échantillons peuvent atteindre jusqu'à 226 g/t en surface. Les veines de quartz qui le contiennent sont enrichies de Cu, Pb, Zn, Ba, Mn, Mo, Cr et Ti, et se séparent de Ag, Hg, As, Bi, Th, U, Sr, Rb, Ir, Se et F (Figure 2.9).

D'après des observations de terrains de dépôts minéralisés et de systèmes hydrothermaux, il apparaît que de nombreux gisements sont localisés à proximité d'intrusions magmatiques ou de failles. Les porphyres, par exemple, sont liés génétiquement à la présence de corps plutoniques.

Les gisements de type orogénique, se situent préférentiellement dans des grands accidents structuraux de type faille, et présentent aussi, dans certains cas, des relations spatiales avec des intrusions magmatiques. De plus, l'altération hydrothermale matérialisée par les auréoles de contact à la périphérie des plutons ou des dykes s'accompagne parfois de minéralisations d'uranium ou d'or et peut donc être considérée comme un marqueur potentiel de concentration anormalement élevée en métaux.

Enfin, au niveau des fonds marins, de nombreux gisements sont liés à la circulation de fluides hydrothermaux chauds se déchargeant par le biais de failles localisées ou au niveau des rides médio-océaniques. Les bassins sédimentaires représentent aussi des contextes particulièrement favorables à la convection hydrothermale en raison, entre autres, de la forte perméabilité des sédiments comparée à celle des roches sur lesquelles ils se déposent. Les phénomènes de compaction qui s'opèrent au sein des bassins permettant la libération des fluides, qui, sous certaines conditions circulent sous forme de cellules convectives, capables de transporter des ions métalliques jusqu'à leur lieu de précipitation.

## 2.5 Les ressources minérales <sup>35</sup> de la mine Sedren

---

<sup>35</sup> Les ressources minérales présentes dans la croûte terrestre constituent une des nombreuses richesses de la planète. Depuis leur découverte datée aux alentours de 6 000 années avant J.-C, les métaux n'ont cessé d'exercer une fascination sur l'homme. La notion de métal semble avoir été appliquée initialement au cuivre, notion qui suggérait un corps dense, malléable, et capable de fondre. (Harcouet, 2005).

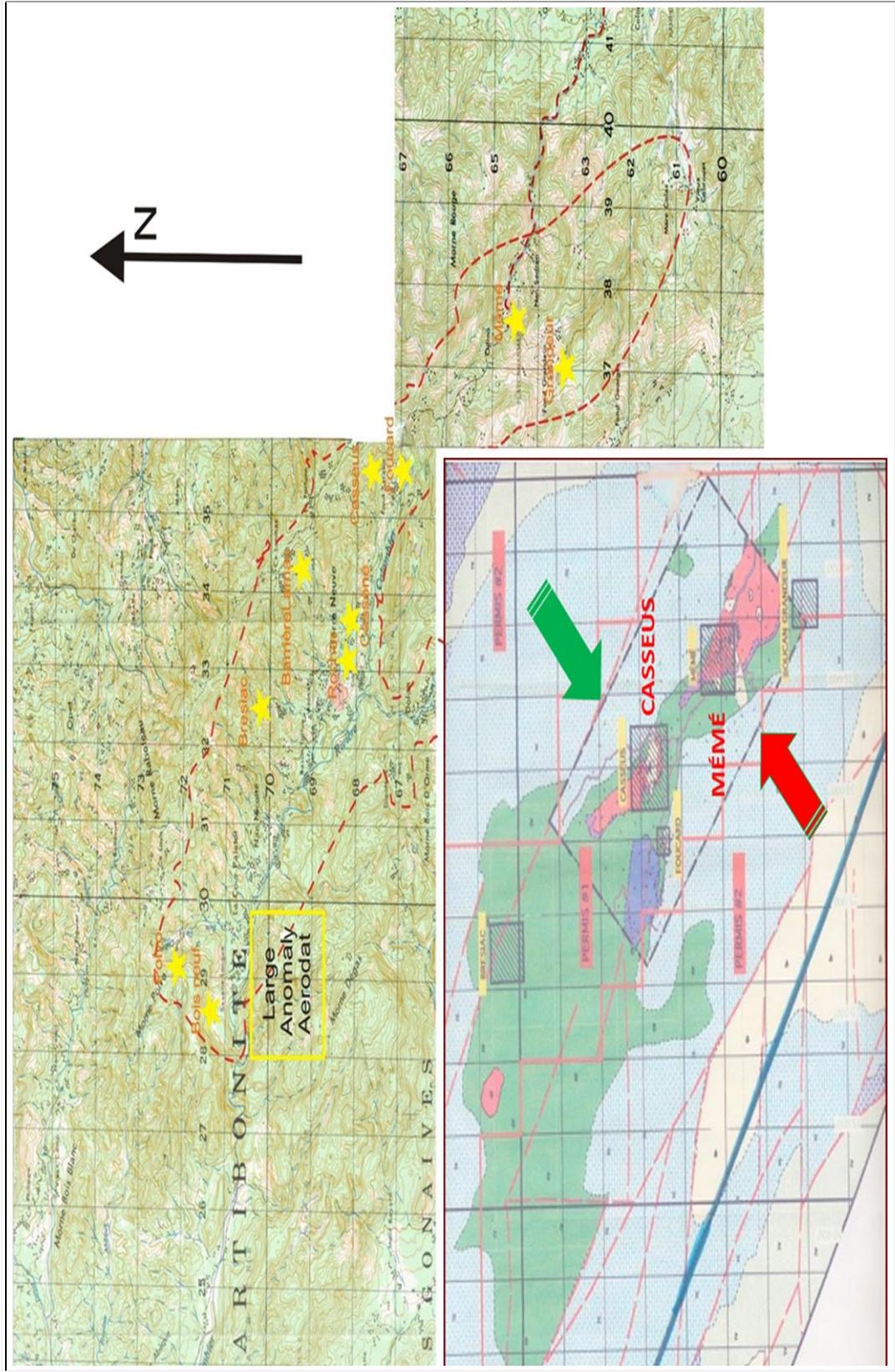


Figure 2.10 : Superficie des gisements et des réserves de minerais de Terre Neuve.— Indices de Jean Rabel: Vert de Gris (Cu, Mo, Au), La Bellée (Cu, Mo, Au), Anse-a-Foleur, La Mine (Cu, Au), Colombo (Au), Riviere des Barres (Cu) - Échelle 1 : 50 000. (Aerodat Inc., 1997).

La superficie des gisements et des réserves de minerais de Terre Neuve est potentiellement exploitable. Les secteurs du sillon volcano-sédimentaire prolifique de Terre-Neuve contenant des gisements de Mémé, de Casséus avec des indices en cuivre, or et argent tels Foucard, Nan Vincent, Casene, Ka Rocher, Barriere Lanmac, Bresiac, Treuil, Provost ou Savane Longue, Nan Vincent, Nan Figuier, Ka Philippe et Hatte Chevalier coïncidant avec des anomalies géo-physicochimiques (skarns auro-cuprifères) significatives couvrent approximativement une superficie de 300 km<sup>2</sup>. Les réserves du gisement de Mémé ont été estimées par la Compagnie Sedren à 2 millions tonnes de minerais avec une teneur de 2% en cuivre (Figure 2.11).

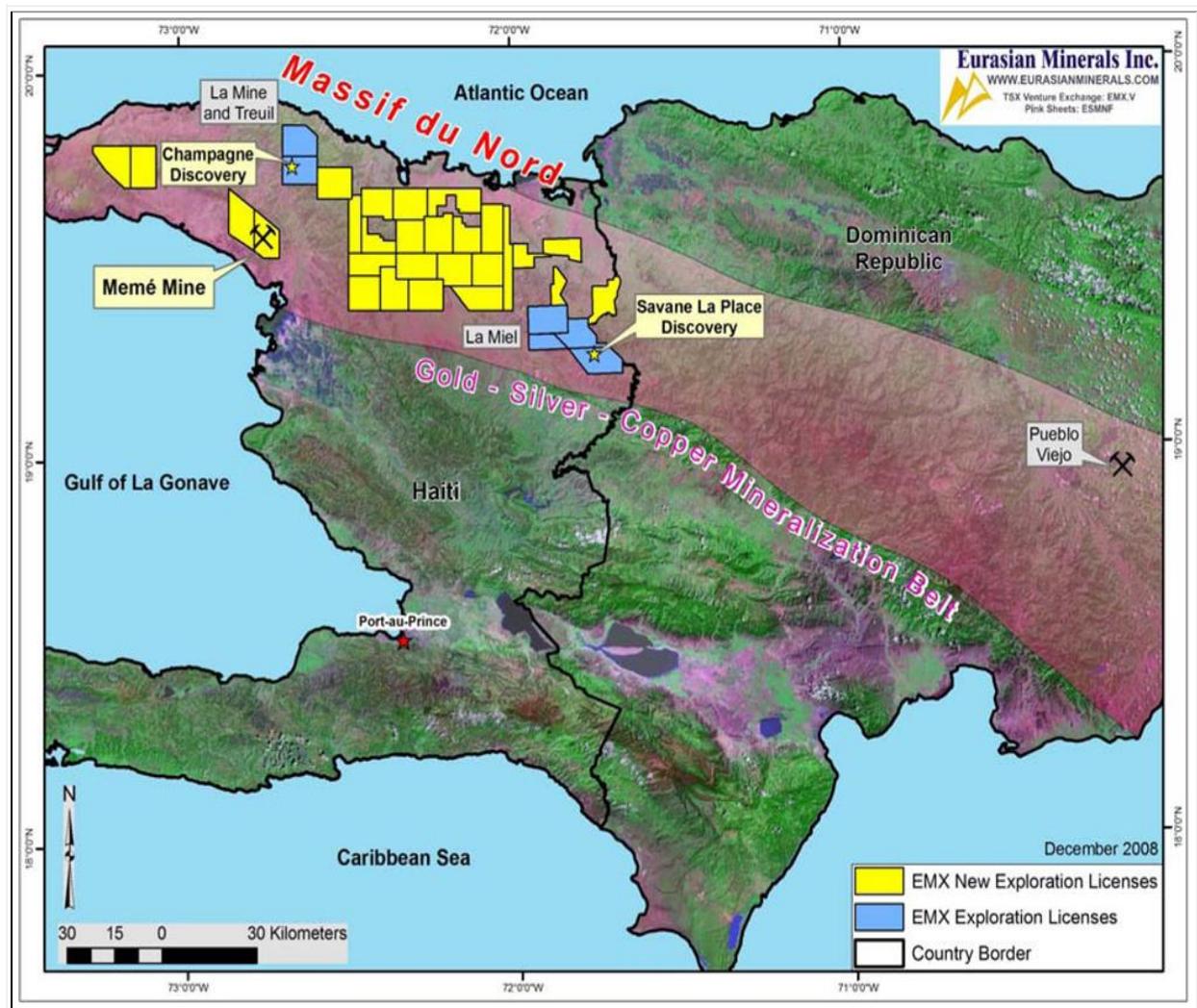


Figure 2.11 : Indices de minéralisations couvrant la presqu'île septentrionale - Massifs métallogéniques du Nord et de Terre Neuve. (Eurasian Minerals Inc., 2008)

La mine Sedren est incontestablement l'important potentiel minier dans le département de l'Artibonite de la presqu'île septentrionale. Les principaux minerais sont le cuivre avec des sous-produits or et argent de nature de minéralisations sulfurées se développant dans les skarns à proximité du contact calcaire intrusif, ou du calcaire-andésite. Les sulfures contiennent de la chalcopryrite, pyrite, bornite, chalcosine et molybdénite (Figure 2.12).

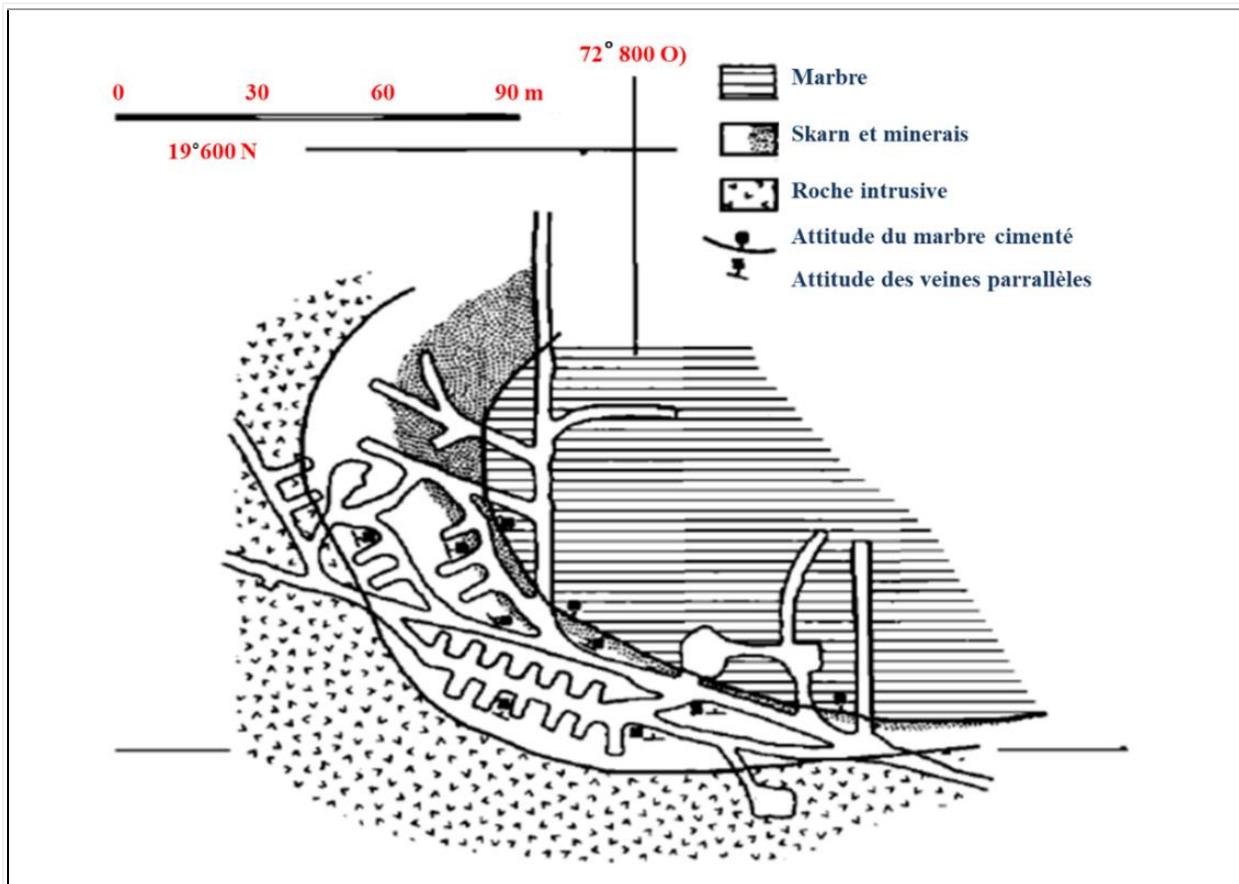


Figure 2.12 : Coupe géologique d'une partie de la galerie Mémé. Au niveau 460 m montrant le parallélisme existant entre le marbre et les veines d'or (Du sommet au bas-fond, les profondeurs extérieures sont de 11, 11, 6 m; les intermédiaires sont de 15, 11, 11, 7.5 m; et les profondeurs intérieures sont de 17, 15, 16 m).

De 1960 à 1971, la Sedren a extrait 1.5 million de tonnes de minerais. Il resterait donc dans la mine environ 2 000 000 tonnes à exploiter. Une extension importante du gisement est possible à Casséus avec des réserves de 6.5 millions de tonnes titrant 0.8 % Cu et 0.4 g/t Au situé à plus de 1 kilomètre au Nord-Ouest de la mine de Mémé. De tous les types de minéralisations observées et échantillonnées, seuls les skarns contiennent certaines valeurs aurifères (l'échantillon HAI-R-1048 est la seule exception avec 1.1 g/t Au).

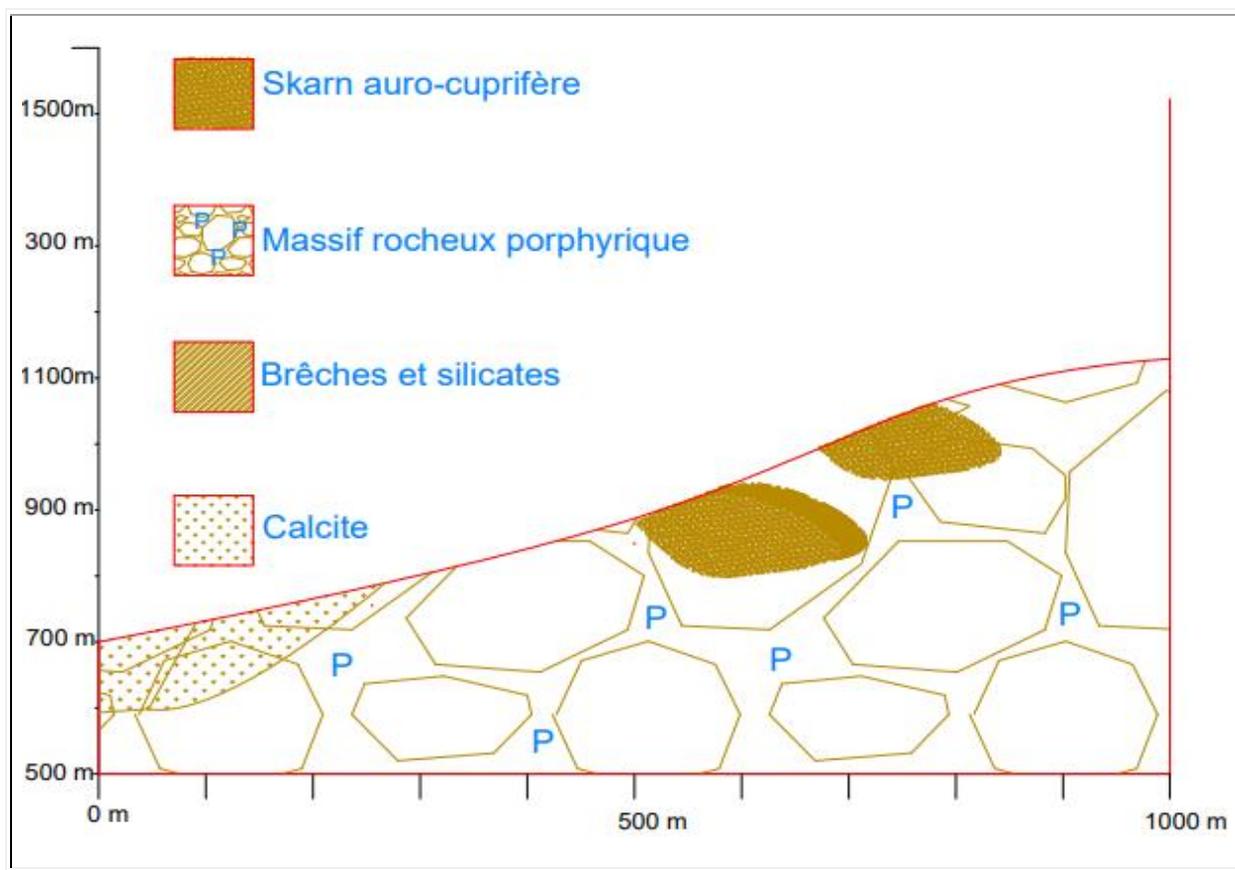


Figure 2.13 : Coupe géologique E-O en 2D de réserves couvrant le secteur Casséus illustrant la concentration d'or sous du marbre. - Minéralogie, réserves Cu-Au porphyriques : Principaux minéraux d'or sont chalcoppyrite, bornite, chalcocite, tennantite; autres minéraux de Cu, Au, electrum, and tellurides; minéraux associés inclus : pyrite, arsenopyrite, magnétite, quartz, biotite, K feldspath, anhydrite, epidote, chlorite, scapolite, albite, calcite, fluorite, brèches et silicates (Modifié de Harnish et al., 1986; Sodemine, 2018).

Les autres types d'indices, même avec des valeurs élevées en Cu, ne donnent que de faibles valeurs en Au. Aucun indice minéralisé n'est connu dans les roches tertiaires. Cette présence de minéralisation connue ouvrait la possibilité à ce qu'il y ait d'autres masses minéralisées en profondeur. Plusieurs évaluations sommaires sont disponibles quant au potentiel résiduel des gisements Mémé et Casséus. Sur la base des 2 millions de tonnes à la mine Mémé et 6.5 millions de tonnes à la mine Casséus, une production de 920 000 tonnes/an est suggérée par Harnish (1983). Selon lui, d'après les vérifications effectuées sur les coupes géologiques, le gisement de Casséus de 6.5 millions de tonnes peut se rendre jusqu' à 25 millions de tonnes puisqu'il demeure ouvert vers l'Est (Sedren) et en profondeur (Figures 2.13 et 2.14).

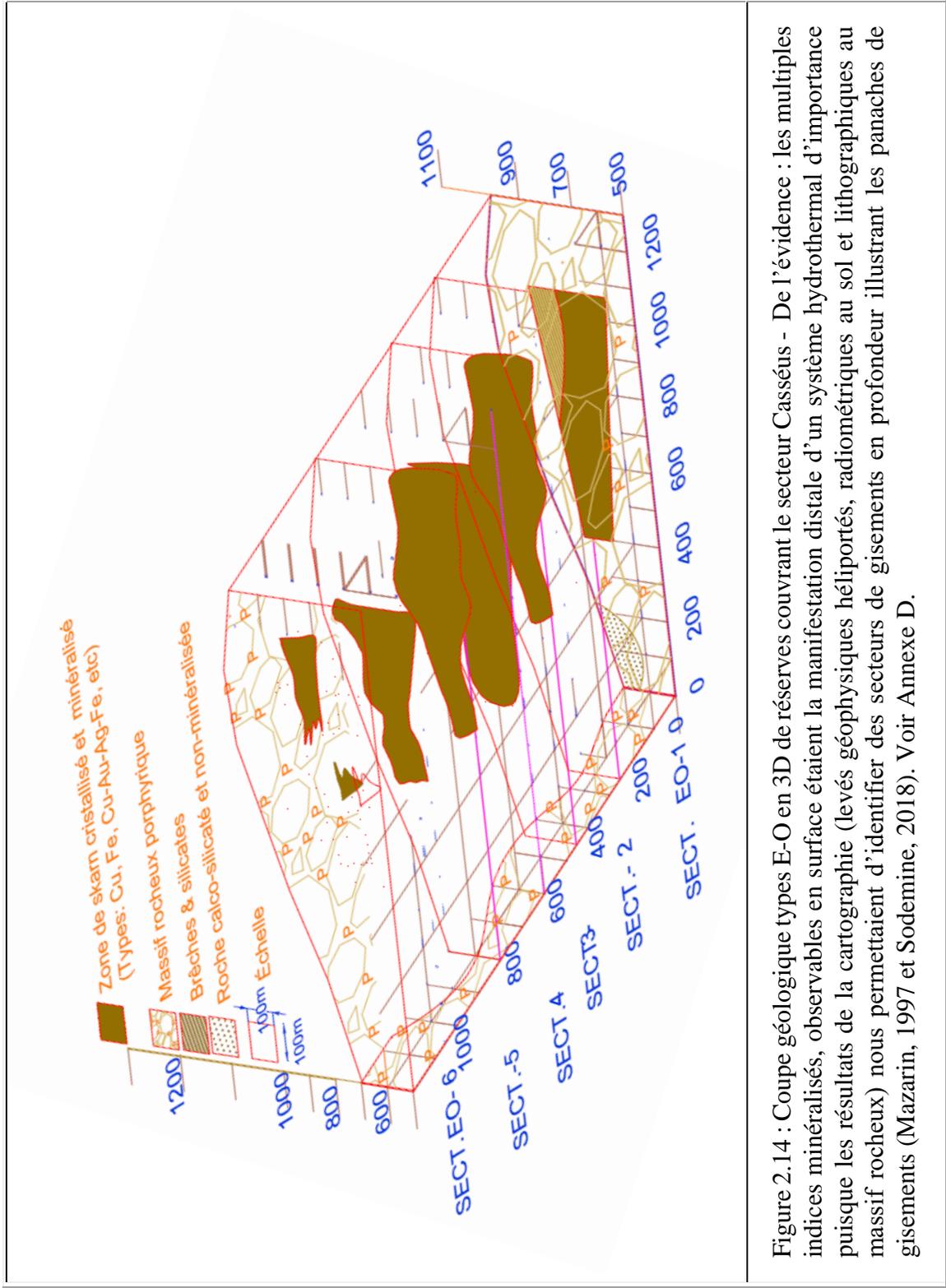


Figure 2.14 : Coupe géologique types E-O en 3D de réserves couvrant le secteur Casséus - De l'évidence : les multiples indices minéralisés, observables en surface étaient la manifestation distale d'un système hydrothermal d'importance puisque les résultats de la cartographie (levés géophysiques héliportés, radiométriques au sol et lithographiques au massif rocheux) nous permettaient d'identifier des secteurs de gisements en profondeur illustrant les panaches de gisements (Mazarin, 1997 et Sodemine, 2018). Voir Annexe D.

## 2.6 Conclusion

La presqu'île d'Haïti se situe à l'extrémité Est de la marge passive Nord de la Jamaïque, qui s'est créée lors de l'extension à l'origine du centre expansif Cayman. Sur l'île d'Hispaniola, une collision avec la plateforme carbonatée des Bahamas a provoqué la formation d'un prisme de collision à convergence Sud-Ouest. Ces événements géologiques enregistrés dans la zone d'étude au cours du temps posent la question de la nature des différents domaines crustaux en présence et de leurs limites, en mer entre la Jamaïque et Haïti et entre Haïti et Cuba, ainsi qu'à terre en Haïti. L'étude bibliographique nous apprend que le domaine des Caraïbes est en majorité composé d'un substratum basaltique Crétacé associé à des gabbros et épaissi par du matériel volcanique, faisant de lui une grande province magmatique. Bref, l'exploration a permis de se familiariser avec le milieu et a révélé que des indices minéralisés, indépendamment de la dimension et de la teneur, étaient plus abondants que ne laissait prévoir la documentation sur la région de Terre Neuve. La grande majorité des indices affleurants a été reconnue antérieurement et fait l'objet de travaux de prospection. Les indices Mémé et Casséus sont, de façon très marquée, les plus importants de la région. Les enclaves de marbre et les zones de skarn, associées à la venue de roches intrusives d'après la Figure 2.12 forment des blocs ou des lambeaux qui sont séparés les uns des autres et distribués à l'intérieur d'un couloir relativement étroit et linéaire. La minéralisation est essentiellement confinée à des veines isolées et espacées, d'épaisseurs centimétriques à décimétrique, avec enrichissement local en chalcosine. Elle se retrouve essentiellement dans les roches d'âge Crétacé, soit dans des roches intrusives intermédiaires à felsiques, des roches volcaniques et des calcaires métamorphisés ou zones de skarns.

Le Tableau 2.4 dresse les caractéristiques du site à l'étude et la Figure 2.15 illustre la forte corrélation présente de cuivre et de l'or trouvés dans le site.

Tableau 2.4 : Données géomécaniques recueillies dans la mine Sedren

Gisement de la galerie MÉMÉ		Gisement de la galerie CASSÉUS	
Caratéristiques	Détails	Caractéristiques	Détails
Localisation faille	Partie affaissée à l'Est.	Localisation faille	Partie surélevée à l'Ouest.
Superficie	97.0 km <sup>2</sup>	Superficie	101.0 km <sup>2</sup>
État	partiellement exploitée (60%)	État	non exploitée (100 %)
Caractéristiques du gisement	Intrusion felsique de skarn à grenat, quartz, calcite, chalcopryrite, et hématite.	Caractéristiques du gisement	Affleurement <sup>36</sup> de skarn à grenat, quartz, calcite, chalcopryrite, hématite et porphyre cuprifère
Composition	massifs (Au, Cu, Fe etc.)	Composition	massifs (Au, Cu, Fe etc.)
Nb. Tunnels (Adits)	7	Nb. Tunnels (Adits)	4
Côtes Profondeur	350, 400 et 460 m 250.0 m	Long. X larg. X prof.	3.65 m X 2.50 m X 178 m
Nb. Entrées accessibles	3	Nb. Entrées accessibles	1
Volume d' H2O (Exhaure)	10 m <sup>3</sup>	Volume d' H2O (Exhaure)	N / A
RÉSERVES & TENEURS	2.0 millions de tonnes 2.0 g/t d'Or (Au) 1.5 % de Cuivre (Cu) ----- d'Argent (Ag)	RÉSERVES & TENEURS	6.50 millions de tonnes 0.12 g/t d'Or (Au) 0.56 % de Cuivre (Cu) ----- d'Argent (Ag)

<sup>36</sup> Affleurement (outcrop, showing) : Roche apparaissant à la surface de la terre. Si cette roche contient une concentration exceptionnelle d'un ou plusieurs minerais d'intérêt économique, on parlera d'un affleurement minéralisé (showing). Tel est le cas du gisement de Casséus.

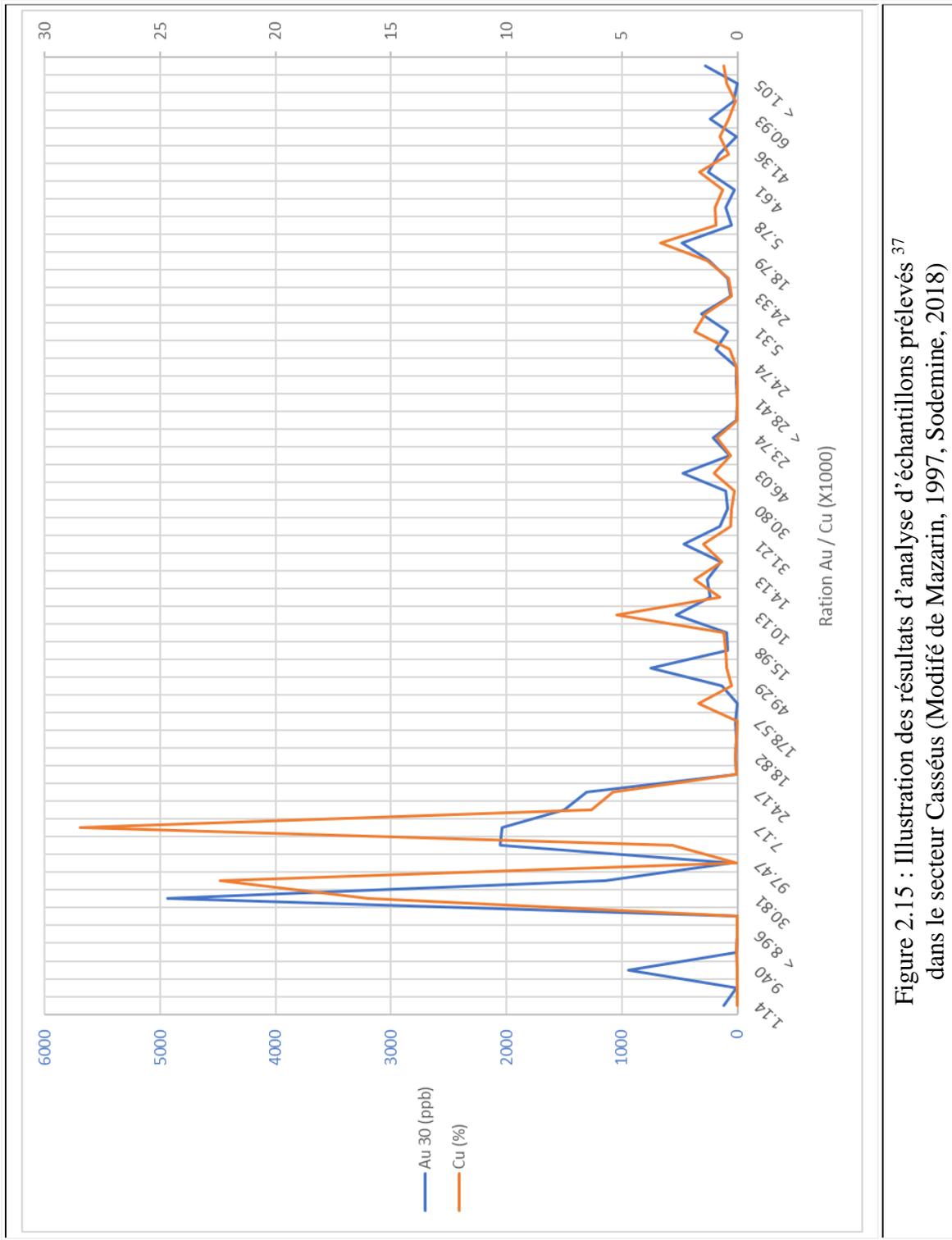


Figure 2.15 : Illustration des résultats d'analyse d'échantillons prélevés<sup>37</sup> dans le secteur Casséus (Modifié de Mazarin, 1997, Sodemine, 2018)

<sup>37</sup> Voir Rapport synthèse des travaux et activités de reconnaissance à l'Annexe D. À noter la forte corrélation entre le cuivre et l'or.



### CHAPITRE 3

## ÉTUDE PHÉNOMÉNOLOGIQUE

## DE MODÈLES RHÉOLOGIQUES EXISTANTS

La rhéologie est la principale technique de caractérisation mécanique dans cette thèse. Ses potentialités sont considérables pour l'identification des comportements : « *élasticité, plasticité, viscoélasticité, viscoplasticité, endommagement, etc.* ». Cependant les phénomènes de non linéarités mis en jeu fragilisent l'analyse et l'interprétation des données expérimentales. La résolution de systèmes dynamiques est très compliquée, car elle se situe entre une réalité souvent complexe et un modèle rhéologique schématique. Elle consiste en une représentation mathématique utilisant les observations et les données expérimentales du système suivi d'ajustement des propriétés de ce modèle à ce système. Le modèle de comportement obtenu ou boîte noire, est généralement non linéaire<sup>38</sup> dont la validité reste limitée à de petites variations autour du point de fonctionnement puisqu'il faut le rendre linéaire pour simplifier les calculs. Trois composantes importantes constituent l'identification: les données, la structure du modèle et le critère d'estimation du modèle. Les différents modèles rhéologiques de prédiction jusqu'au-delà de l'écroutissage<sup>39</sup> seront présentés.

Les généralités sont illustrées à la Figure 3.1. Des explications suivront.

---

<sup>38</sup> Un modèle est dit non linéaire si et seulement si sa représentation mathématique est de la forme :

$$\left[ a_0 + a_1 \left( \frac{d}{dt} \right) + a_2 \left( \frac{d}{dt} \right)^2 + \dots + a_n \left( \frac{d}{dt} \right)^n \right] \sigma = \left[ b_0 + b_1 \left( \frac{d}{dt} \right) + b_2 \left( \frac{d}{dt} \right)^2 + \dots + b_n \left( \frac{d}{dt} \right)^n \right] \varepsilon$$

Où : les termes  $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$  et  $b_0, b_1, b_2, \dots, b_n$  ne sont pas constants.

<sup>39</sup> Écroutissage (cold work): État des minéraux dont certaines propriétés physiques sont modifiées telles que la résistance, la dureté et la résilience par suite de déformations dues au travail mécanique à froid.

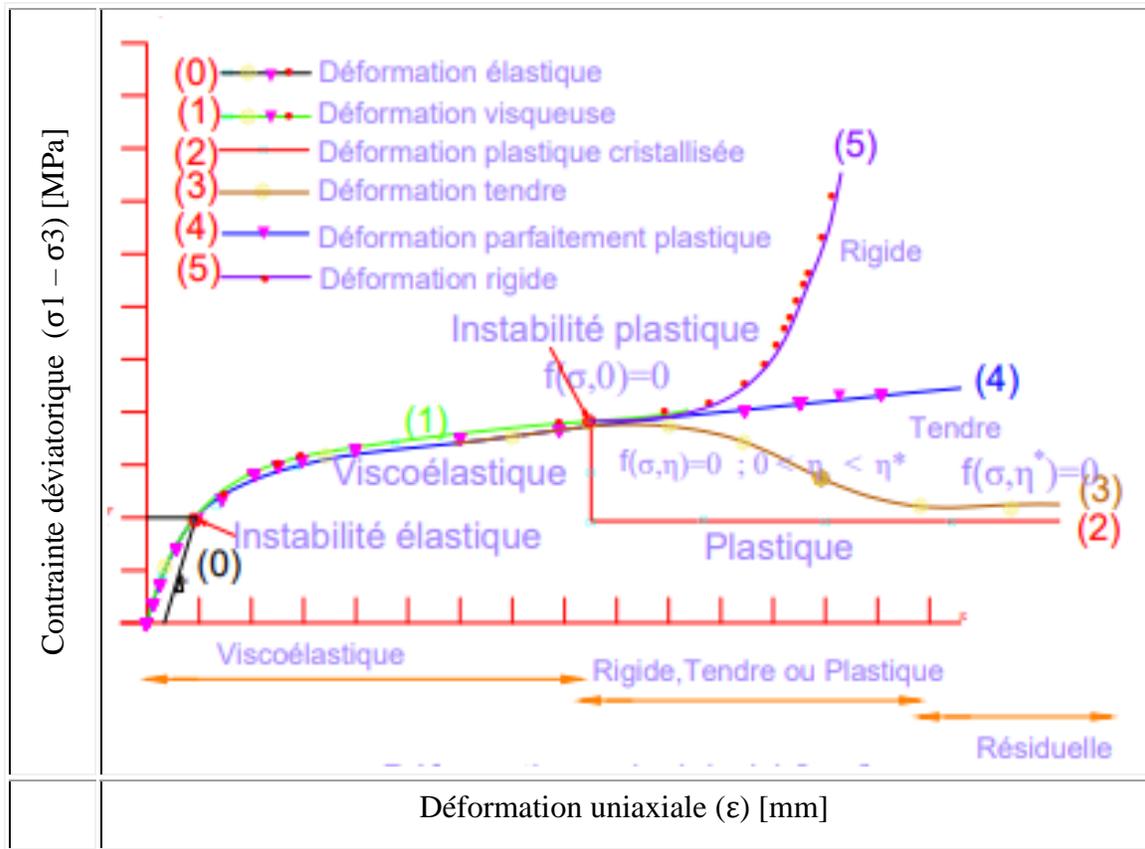


Figure 3.1 : Courbe viscoplastique de compression versus la déformation uniaxiale - (1) Phase élastique : Le modèle pratique est donné par un ressort à spires parfaitement élastique et sans masse. (2) phase visqueuse : Le modèle est réalisé par un piston perforé se déplaçant dans un liquide parfait: si on tire sur ce piston, il se déplace quelque soit la contrainte protocole d'essai de viscosité). (3), (4) ou (5) phases plastiques : Le modèle rhéologique est un patin frottant sur une surface horizontale; si on tire sur le patin, il se déplace lorsque la force de traction atteint un certain seuil.

### 3.1 Représentation mathématique de modèles rhéologiques

« Le comportement dépendant du temps en général fait référence au comportement dépendant de la vitesse, au fluage, à la fracturation retardée et à la réduction de la résistance à long terme » (Malan, 2002) et « est généralement associé à des matériaux rocheux principalement riches en argile et aux cavités salines qui présentent des déformations de fluage », comme discuté dans la littérature (Cidivini et al. 1979; Ottosen 1986). Cependant, selon Barla, (1995); Bhasin et Grimstad (1996), la dépendance au temps a été observée lors de la construction de tunnels dans des massifs rocheux faillés qui sont maintenus sous de fortes contraintes *in situ*. Une réduction de la résistance en fonction du temps peut également être observée dans des massifs intacts.

Il existe deux types de déformation en terrain faible : a) immédiate; b) dépendante du temps. «*Des déformations immédiates peuvent être causées par la réponse élastique non drainée du massif rocheux au processus d'excavation et peuvent également inclure des éléments élastoplastiques* » (Aristorenas, 1992). Cependant, les roches ne suivent pas uniquement les lois d'élasticité, de plasticité ou de viscoplasticité. Il est toujours important de déterminer la relation contrainte - déformation associée aux roches et la déformation en fonction du temps afin de prédire le comportement mécanique des types de roches d'intérêt. «*Plusieurs modèles mécaniques ont été suggérés pouvant avoir une application directe ou indirecte à la description du comportement de la roche* » (Lama et Vutukuri, 1978).

Les méthodes numériques et analytiques employées pour définir et prédire le comportement dépendant du temps justifient également des recherches et des améliorations plus poussées. Les phénomènes dépendant du temps peuvent être définis comme des mécanismes agissant puis s'affaiblissant sur le massif rocheux au fil du temps. De plus, comme le comportement rhéologique du massif rocheux souterrain est une corrélation complexe entre le fluage, la fracturation retardée et la résistance à long terme, il sera donc fonction du temps.

En effet, des chercheurs ont développé des lois et ont proposé des formulations pour simuler le temps de comportement des géomatériaux. Les modèles empiriques sont des fonctions de «*Temps de déformation* ».

Une sélection de lois empiriques et dépendant du temps est présentée dans le Tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Modèles empiriques dépendant du temps  
(A, B, C, D sont des constantes d'ajustement du modèle, d'après Mirza, 1978)

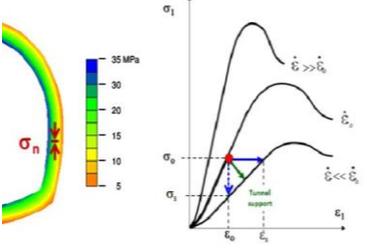
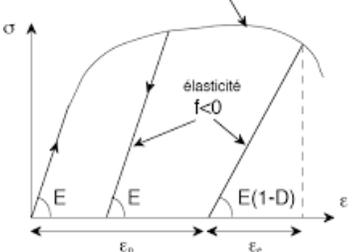
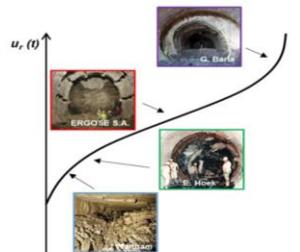
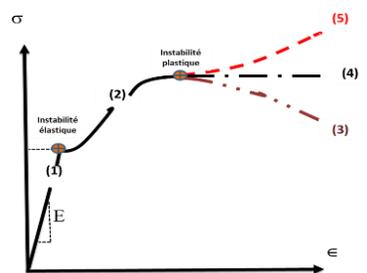
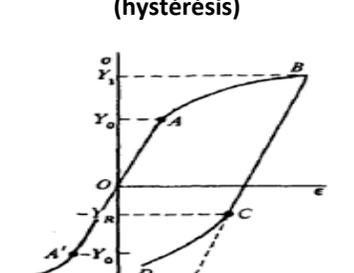
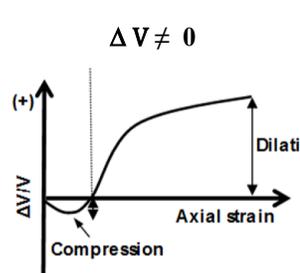
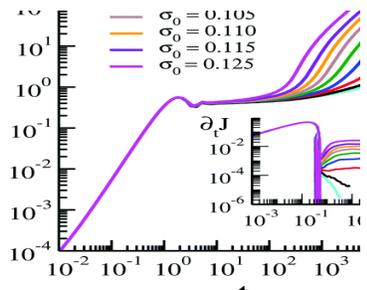
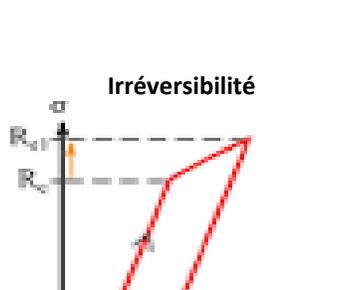
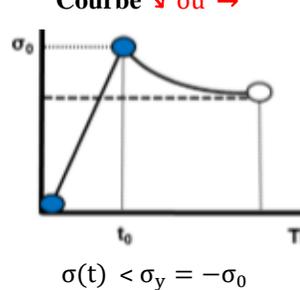
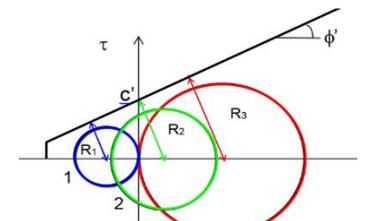
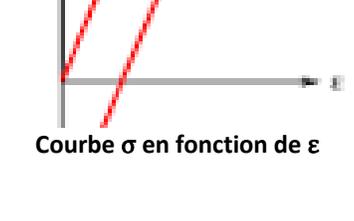
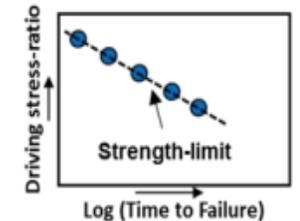
No.	Formules	No.	Formules
3.1	$\epsilon = At^m$	3.11	$\epsilon = A t / (1 + B t)$
3.2	$\epsilon = A + Bt^m$	3.12	$\epsilon = A + B t - C \exp(-D t)$
3.3	$\epsilon = At^m + Bt^n + Ct^p$	3.13	$\epsilon = A[1 - \exp(-B t)] + C[1 - \exp(-D t)]$
3.4	$\epsilon = At^m + Bt^n + Ct^p + Dt^e$	3.14	$\epsilon = At^m + Bt^n + Ct^p + Dt^e$
3.5	$\epsilon = A \log(t)$	3.15	$\epsilon = A + B \log(t) + C t^n$
3.6	$\epsilon = A + B \log(t)$	3.16	$\epsilon = A + B t^n + C t$
3.7	$\epsilon = A \log(t + B)$	3.17	$\epsilon = A \log[1 + (t/B)]$
3.8	$\epsilon = A \log(B + C t)$	3.18	$\epsilon = A[1 - \exp(B - C t^n)]$
4.9	$\epsilon = A + B \log(t + C)$	3.19	$\epsilon = A[1 - \exp(-B t)] = A \exp(B)$
3.10	$\epsilon = A + B \log(t + D t)$		

Note : Ce sont des modèles empiriques reliés à l'état de la recherche. Il est à remarquer l'absence du paramètre déplacement (x) qui devrait tenir compte de la convergence des fronts de taille.

Ces lois ne tiennent pas compte simultanément de la déformation et du temps. Ces lois sont des modèles linéaires. En d'erechef, elles obéissent au critère de réversibilité qu'on retrouve l'explication dans le Tableau 3.2 dressé par Paraskevopoulou (2016) qui fait la synthèse des phénomènes dépendant du temps qui affectent et régissent le comportement des géomatériaux.

Les modèles empiriques dépendant du temps sont appelés lois de convergence, lois de fluage ou lois de puissance. « Ces modèles sont dérivés de données de tests pour certains types de roches et peuvent être utilisés comme outils de conception préliminaire » (Griggs, 1939; Aydan et al.1996; Sign et al.1997; Hoek, 2001). Senseny (1983) a passé en revue huit modèles pour le sel gemme et a constaté que même s'ils peuvent reproduire le comportement de déformation observé lors d'expériences en laboratoire à contrainte et température constante; ces modèles n'ont en fait aucune signification physique.

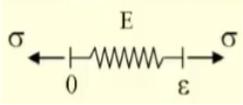
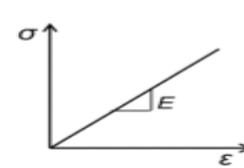
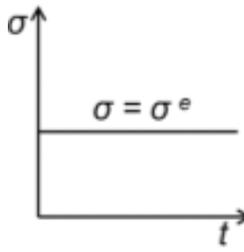
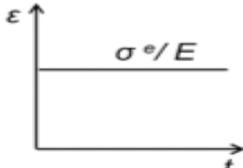
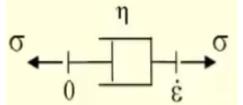
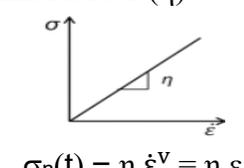
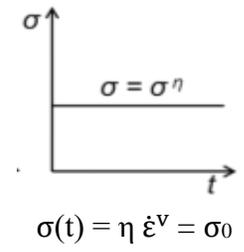
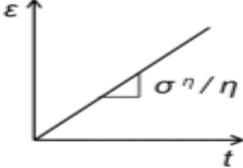
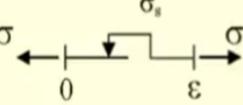
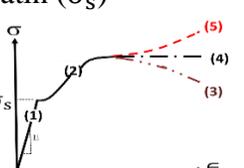
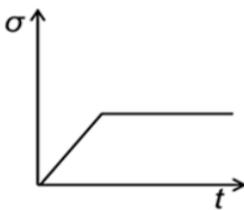
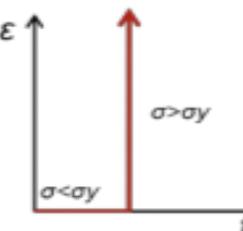
Tableau 3.2 : Nomenclature des phénomènes dépendant du temps  
(Adapté de Paraskevopoulou, 2016)

Phénomènes		Réversibilité	Réponse physique
<p><b>Courbes <math>\sigma</math> versus <math>\epsilon</math> dépendant du Temps</b></p> 	<p><b>Résistance</b> ↗ baisse avec le temps</p>	<p><b>Élasticité</b></p> <p>plasticité et endommagement <math>f=0</math></p> <p>élasticité <math>f&lt;0</math></p>  <p>Courbe <math>\sigma</math> en fonction de <math>\epsilon</math></p>	<p><b>Fluage <math>u_r(t)</math> vs <math>t</math> : Courbe</b></p> <p>↗ <math>\Delta V = 0</math></p> 
<p><b>Courbe <math>\sigma</math> versus <math>\epsilon</math> (Incrémentation du Temps →)</b></p> 	<p>- C. positif ↗ : <math>\sigma &gt; \sigma_y = \sigma_0</math> - C. neutre → : <math>\sigma = \sigma_y = \sigma_0</math> - C. négatif ↘ : <math>\sigma &lt; \sigma_y = \sigma_0</math></p>	<p><b>Inélasticité (hystérésis)</b></p>  <p>Courbe <math>\sigma</math> en fonction de <math>\epsilon</math></p>	<p><b>Contraction / Dilatation versus déformation axiale :</b></p> <p><math>\Delta V \neq 0</math></p> 
<p><b>Courbe de Complaisance vs T</b> <math>J(t) = 1 / E(t)</math></p> 	<p><b>Module de Young</b> ↘ baisse avec le temps</p>	<p><b>Irréversibilité</b></p>  <p>Courbe <math>\sigma</math> en fonction de <math>\epsilon</math></p>	<p><b>Relaxation <math>\sigma(t)</math> vs <math>t</math> :</b></p> <p><b>Courbe ↘ ou →</b></p>  <p><math>\sigma(t) &lt; \sigma_y = -\sigma_0</math></p>
<p><b>Courbes de Mohr <math>\tau</math> versus <math>\sigma</math></b></p> 	<p><b>Qualité Roche</b> ↘ baisse avec le temps</p>	<p><b>Qualité Roche</b> ↘ baisse avec le temps</p>  <p>Courbe <math>\sigma</math> en fonction de <math>\epsilon</math></p>	<p><b>Dégradation : <math>\Delta V \neq 0</math></b></p> 

### 3.2 Typologie de modèles rhéologiques

Le Tableau 3.3 résume le comportement phénoménologique de trois modèles rhéologiques simples pour la construction de schémas-blocs de modèles de matériau.

Tableau 3.3 : Les briques de base pour les modèles de matériau  
(Bingham et Herschel, 2002)

TYPES DE CORPS $f(\sigma, \varepsilon, \dot{\varepsilon}, E, G, \eta, \Theta) = 0$	MODÈLES RHÉOLOGIQUES	ESSAIS DE FLUAGE (RÉPONSES)	ESSAIS DE COMPRESSION
<p>Hooke (H), 1678</p>  <p><math>f(\sigma, \varepsilon, \varepsilon; E) = 0</math> Phase élastique (1) <math>\varepsilon = (L_1 - L_0) / L_0</math> <math>\varepsilon = (A_1 - A_0) / A_0</math></p>	<p>Ressort (E)</p>  <p><math>\sigma_E(t) = E \varepsilon^e = E \varepsilon</math> <math>\sigma_E(t) = E^* \varepsilon(t)</math> <math>\sigma_E(t) = E * f(t)</math></p>	 <p><math>\sigma_E(t) = E \varepsilon^e = \sigma_0</math></p>	 <p><math>\dot{\varepsilon}(t) = A t = (\sigma / E) t</math> Où : <math>A = (\sigma / E) = \text{cte}</math></p>
<p>Newton (N), 1687</p>  <p><math>f(\sigma, \varepsilon, \dot{\varepsilon}, G, \eta) = 0</math> Phase visqueuse (2)</p>	<p>Amortisseur (<math>\eta</math>)</p>  <p><math>\sigma_\eta(t) = \eta \dot{\varepsilon}^v = \eta \dot{\varepsilon}</math> <math>\sigma_\eta(t) = \eta * \delta \varepsilon(t) / \delta \tau</math> <math>\sigma_\eta(t) = \eta * f'(t)</math></p>	 <p><math>\sigma(t) = \eta \dot{\varepsilon}^v = \sigma_0</math></p>	 <p><math>\dot{\varepsilon}(t) = A t = (\sigma / \eta) t</math> <math>A = (\sigma / \eta) = \text{constante}</math></p>
<p>St-Venant (V), 1855</p>  <p><math>f(\sigma, \varepsilon, \dot{\varepsilon}, \dot{\varepsilon}, \Theta) = 0</math> <math>-\sigma_0 &lt; \sigma &lt; +\sigma_0</math></p> <p>3 Phases plastiques avec écoulement :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Négatif <math>\sigma &lt; \sigma_0</math></li> <li>• Neutre <math>\sigma = \sigma_0</math></li> <li>• Positif <math>\sigma &gt; \sigma_0</math></li> </ul>	<p>Patin (<math>\sigma_s</math>)</p>  <p>- Courbe pos. <math>\nearrow</math> <math>\sigma(t) &gt; \sigma_y = +\sigma_0</math> - Courbe neutre <math>\rightarrow</math> <math>\sigma(t) = \sigma_y = \sigma_0</math> - Courbe nég. <math>\searrow</math> <math>\sigma(t) &lt; \sigma_y = -\sigma_0</math></p>	 <p><math>\sigma(t) = (m/A) \ddot{u}(t)</math> Où : <math>\sigma_\Theta(t) = \sigma_y = \sigma_0</math> <math>\sigma_\Theta(t) = \Theta = \text{Cte}</math></p>	 <p><math>\dot{\varepsilon} = 0</math> si <math> \sigma  &lt; \sigma_0</math> <math>\dot{\varepsilon} &lt; 0</math> si <math> \sigma  = \sigma_0</math> <math>\dot{\varepsilon} &gt; 0</math> si <math> \sigma  &gt; \sigma_0</math></p>

Les modèles rhéologiques sont des modèles unis et/ou bidimensionnels constitués par des corps de Hooke (ressorts) représentant le comportement élastique, des corps de Newton (amortisseurs) représentant le comportement visqueux et des corps de St. Venant (patins) représentant le comportement plastique.

Nous distinguons : 3 modèles rhéologiques fondamentaux de base pour les matériaux.

- a) Les corps élastiques : La déformation est réversible et proportionnelle à l'intensité de la contrainte. Le temps n'intervient pas dans la déformation.
- b) Les corps visqueux : La valeur de la déformation dépend de la durée d'application de la contrainte. Pour une contrainte donnée non nulle, la déformation se fait à vitesse constante. Après suppression de la contrainte, le système conserve son état final.
- c) Les corps plastiques : La déformation ne se produit qu'à partir d'un certain seuil de contrainte. Lorsque ce seuil est atteint, la déformation se produit sans qu'il soit possible d'augmenter la valeur de la contrainte. La déformation conserve la valeur atteinte lorsque la contrainte cesse.

En général, les modélisations à comportement visqueux de déformations différées sont développées suivant deux types d'approches adoptées :

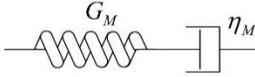
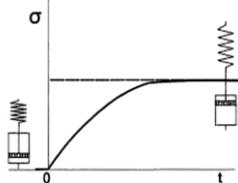
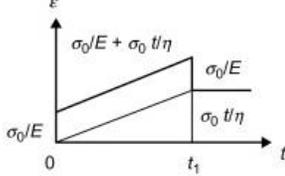
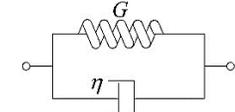
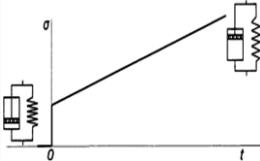
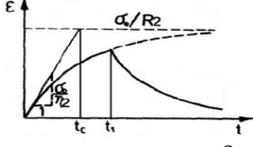
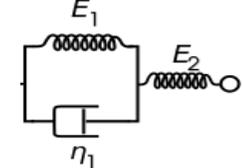
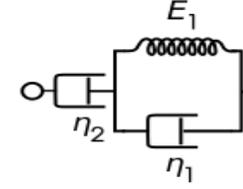
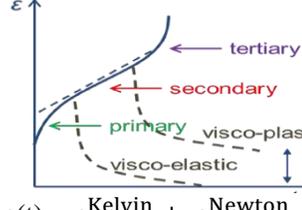
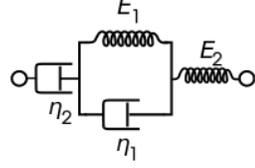
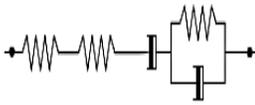
- a) Approche viscoélastique de modèles de matériaux

L'approche viscoélastique est trop simpliste pour prendre en compte le comportement différé des matériaux.

- La relation force ( $F$ ) versus déformation ( $\delta$ ) dans un massif rocheux est gouvernée par le taux de chargement.
- La relation contrainte ( $\sigma$ ) versus élongation ( $\varepsilon$  %) est représentée par l'équation différentielle de la forme :

Le Tableau 3.4 dresse une synthèse des modèles viscoélastiques de base.

Tableau 3.4 : Étude phénoménologique des modèles rhéologiques viscoélastiques  
(Bingham et Herschel 2002)

TYPES	MODÈLES rhéologiques	ESSAIS de fluage $\sigma = f(\varepsilon, \dot{\varepsilon})$	ESSAIS de compression / temps
<p>Maxwell (M) (1867) Phase élasto-visqueuse (écrouissage – ou +) Phase élasto-plastique (écrouissage neutre)</p>	 $\dot{\varepsilon}(t) = \dot{\varepsilon}_1^e + \dot{\varepsilon}_2^{vp}$ $\dot{\varepsilon}(t) = (\dot{\sigma}_0/G_1) + (\sigma_0/\eta_2)$	 $\sigma = \sigma_1 = \sigma_2 = \tau = \sigma_0$ $\sigma + \frac{\eta}{E} \dot{\sigma} = \eta \dot{\varepsilon}$	 $\varepsilon(t) = \varepsilon_1^e + \varepsilon_2^{vp}$ $\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{E_M} + \frac{\sigma}{2\eta_M} t$
<p>Kelvin-Voigt (K-V) (1850) Phase élasto-visqueuse (écrouissage positif)</p>	 $\dot{\varepsilon}(t) = \dot{\varepsilon}_1^e = \dot{\varepsilon}_2^{vp}$ $\dot{\varepsilon}(t) = \left(\frac{\dot{\sigma}_0}{E_1}\right) = \left(\frac{\sigma_0}{\eta_2}\right)$	 $\sigma = \sigma_1 + \sigma_2 = \sigma_0$ $\sigma = G \varepsilon + \eta \dot{\varepsilon}$	 $\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{G_K} \left[ 1 - e^{-\left(\frac{G_K}{2\eta_K}\right)t} \right]$
<p>Zener (1965) (3 paramètres) solidification (K-V = K-H) Phase élasto-visqueuse (écrouissage positif)</p>		$\sigma + \frac{\eta}{E_2} \dot{\sigma} = E_1 \varepsilon + \left(\frac{\eta(E_1 + E_2)}{E_2}\right) \dot{\varepsilon}$	$\varepsilon(t) = \varepsilon_1^{Kelvin} + \varepsilon_2^{Hooke}$ $\varepsilon(t) = \left[\frac{\sigma}{G_K}\right] \left[ 1 - e^{-\left(\frac{G_K}{2\eta_K}\right)t} \right] + \frac{\sigma}{E_2^H}$
<p>Jeffreys (1964) (3 paramètres- Liquefaction) Phase élasto-visqueuse (écrouissage positif)</p>		$\sigma + \frac{\eta_2}{E_1} \dot{\sigma} = \left(\frac{\eta_1 + \eta_2}{E_1}\right) \dot{\varepsilon} + \left(\frac{\eta_1 \eta_2}{E_1}\right) \ddot{\varepsilon}$	 $\varepsilon(t) = \varepsilon_1^{Kelvin} + \varepsilon_2^{Newton}$
<p>Burgers (1948) Phase élasto-visqueuse (écrouissage – ou +) Phase élasto-plastique (écrouissage neutre)</p>	 $\dot{\varepsilon}(t) = \dot{\varepsilon}_1^K + \dot{\varepsilon}_2^{Max}$	$\sigma + \frac{\eta_M(G_M + G_K) + \eta_K(G_M)}{G_M G_K} \dot{\sigma} + \frac{\eta_M \eta_K}{G_M G_K} \ddot{\sigma} = \eta_M \left( \dot{\varepsilon} + \frac{\eta_K}{G_K} \ddot{\varepsilon} \right)$	$\varepsilon(t) = \varepsilon_1^{Kelvin} + \varepsilon_2^{Maxwell}$ $\varepsilon(t) = \frac{\sigma}{E_M} + \frac{\sigma}{2\eta_M} t + \left[\frac{\sigma}{G_K}\right] \left[ 1 - e^{-\left(\frac{G_K}{2\eta_K}\right)t} \right]$
<p>Abdil-Hady (1966)</p>		$\sigma = \sigma_H + \sigma_{Max} + \sigma_{K-V}$	$\varepsilon(t) = \varepsilon_1^{K-V} + \varepsilon_2^M$

Soient :

$$[a_0 + a_1 \left(\frac{d}{dt}\right) + a_2 \left(\frac{d}{dt}\right)^2 + \dots + a_n \left(\frac{d}{dt}\right)^n] \sigma = [b_0 + b_1 \left(\frac{d}{dt}\right) + b_2 \left(\frac{d}{dt}\right)^2 + \dots + b_n \left(\frac{d}{dt}\right)^n] \varepsilon \quad (3.21)$$

$$[a_0 + \sum_{i=1}^n a_i \left(\frac{d}{dt}\right)^i] \sigma = [b_0 + \sum_{i=1}^n b_i \left(\frac{d}{dt}\right)^i] \varepsilon \quad (\text{Loi de Hooke généralisée}) \quad (3.22)$$

- Si tous les coefficients  $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$  et  $b_0, b_1, b_2, \dots, b_n$  sont constants, le matériau est de type linéaire visco-élastique.
- Si tous les coefficients  $a_1, a_2, \dots, a_n$  et  $b_1, b_2, \dots, b_n$  sont nuls,  $[a_0] \sigma = [b_0] \varepsilon$

$$\text{Alors, } \sigma = \frac{[b_0]}{[a_0]} \varepsilon = E \varepsilon \quad (3.23)$$

Le comportement visqueux d'un géomatériau est un comportement qui dépend de la vitesse de la sollicitation. Les modèles viscoélastiques  $F(\sigma, \dot{\sigma}, \varepsilon, \dot{\varepsilon}) = 0$  ne sont utilisables que pour un comportement dans le domaine des déformations.

Les paramètres du modèle Burgers (Figure 3.2) peuvent être dérivés des résultats des tests de fluage (voir Annexe G). Selon Goodman (1980), « *les paramètres viscoélastiques ( $K, M, G_K, G_M$ ) peuvent être estimés en ajustant les résultats expérimentaux des tests de charge statique (fluage) à la courbe mathématique de déformation réponse du modèle Burgers à différents intervalles de temps* ».

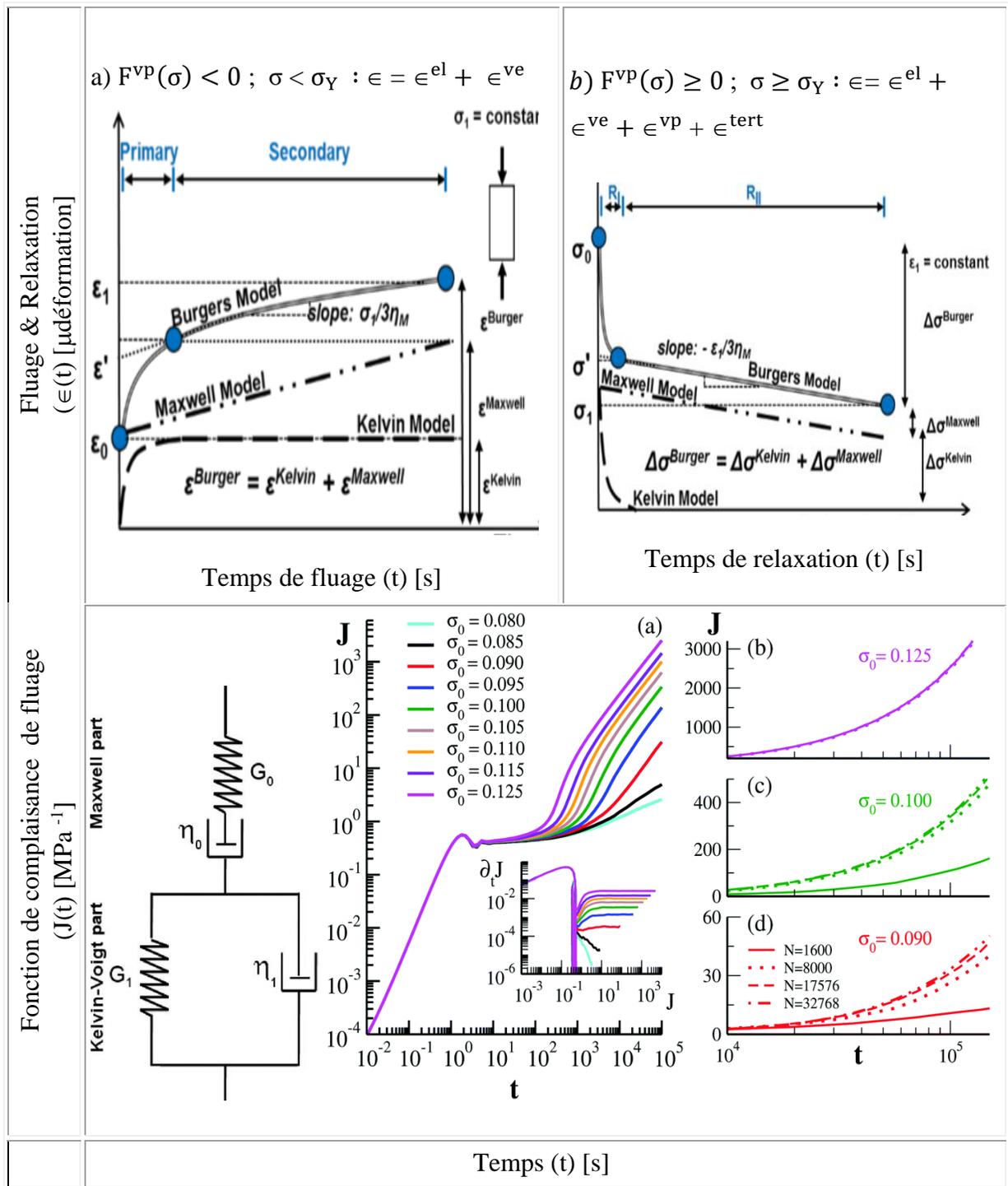


Figure 3.2 : Représentation mathématique de fluage et de relaxation du modèle de Burgers (1948) et ses composantes viscoélastiques équivalentes - Les modèles Maxwell et Kelvin ont des corps analogues, mais simulent des comportements mécaniques différents. Ce sont deux modèles viscoélastiques linéaires. Une combinaison en série de composants de modèles Kelvin et Maxwell est appelée le modèle de Burgers couramment utilisé pour simuler le fluage (Paraskevopoulou, 2016 et Cabriolu, 2018).

## b) Approche viscoplastique de modèles de matériaux

La viscoplasticité a été introduite pour la première fois par Perzyna (1966) comme une extension de la théorie de la plasticité. La viscoplasticité a été appliquée à l'analyse du comportement des roches par de nombreux chercheurs (Ladanyi, 1993; Cristescu et Gioda 1994; Gioda et Cividini, 1996; Boidy et coll. 2002; Pellet et coll. 2005; Debernardi, 2008; Kalos, 2014) pour examiner et étudier le comportement dépendant du temps de fluage des roches.

L'approche viscoplastique est simpliste pour tenir compte du comportement différé des matériaux. Elle est alors très utile dans le domaine des déformations importantes. Les comportements de type différé se qualifient de viscoplastiques, selon qu'il existe ou non des déformations plastiques, un seuil en dessous duquel le comportement peut être considéré comme élastique (Figures 3.3). Cependant, il a été observé que l'application de cette approche est limitée en raison de la complexité d'accouplement en mécanique.

L'élément principal utilisé dans les modèles viscoplastiques est l'élément St.Venant car il permet les déformations plastiques de se produire. Cependant, l'élément St-Venant n'est généralement pas utilisé en série avec d'autres éléments. Car, il pourrait représenter un début soudain de déformation plastique sans contrainte ou de fragilité. Voir la allure du schéma-bloc de Nishihara ( Tableau 3.5). La Figure du modèle viscoélastique de déformation vs temps dans le Tableau 3.5 donne des détails. D'où la loi de CVISC (2015) adaptée dans le code Flac2D utilisé pour l'étude.

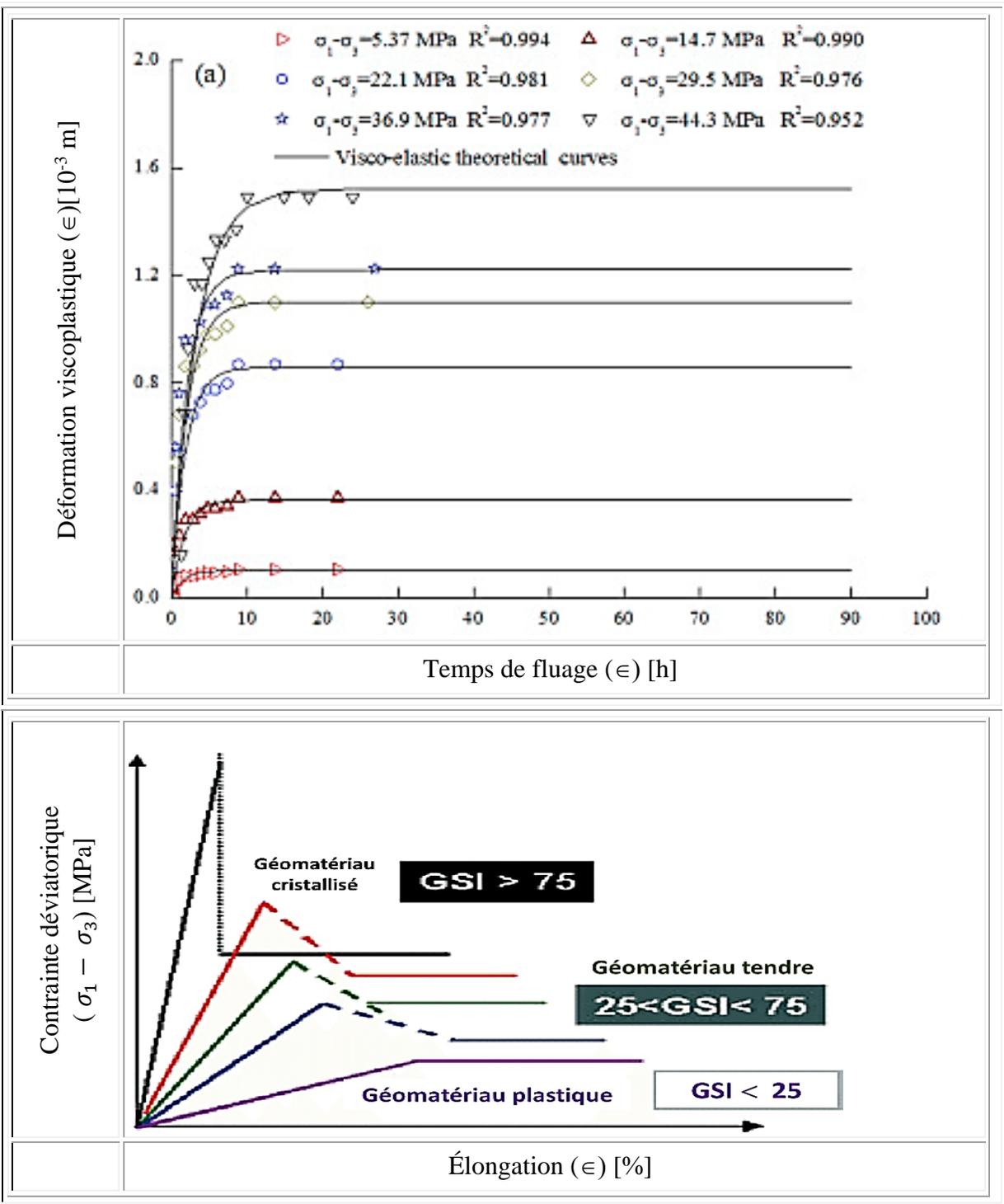
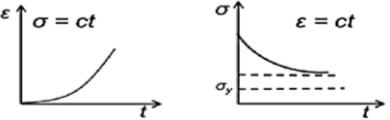
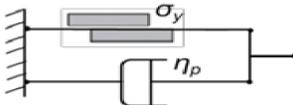
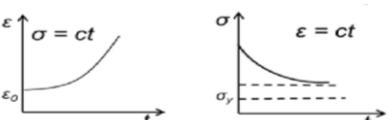
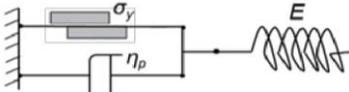
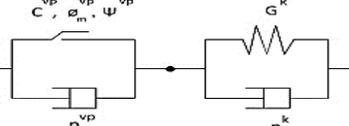
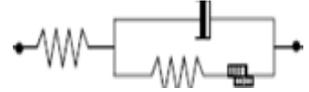
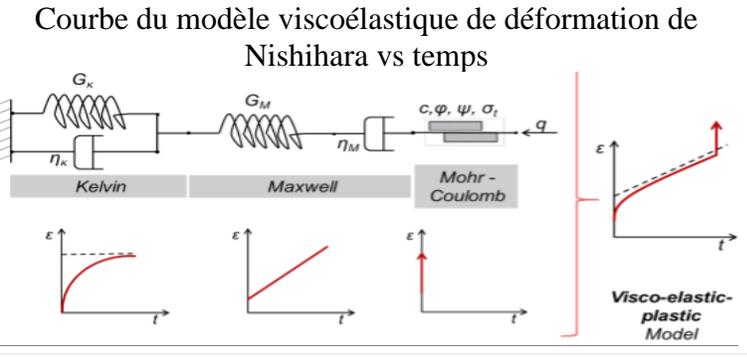


Figure 3.3 : Courbes de comportement viscoplastique des macromolécules orientées. Massif rocheux tendre, rigide ou parfaitement plastique subissant de grandes contraintes différées de confinement. (Adapté de Deb, 2006; Li, X.Z.et al., 2016.).

Le Tableau 3.5 dresse une synthèse des modèles viscoplastiques de base existants.

Tableau 3.5 : Étude phénoménologique des modèles rhéologiques viscoplastiques (Bingham et Herschel, 2002)

LOIS	ESSAI DE FLUAGE $f = f(t, \sigma, \epsilon)$	MODÈLES RHÉOLOGIQUES
BINGHAM, 1922	 <p> <math>\sigma = E\epsilon^c</math> quand <math>\sigma &lt; 0</math>  <math>\sigma + \frac{\eta}{G}\dot{\sigma} = \theta + \eta\dot{\epsilon}</math> quand <math>\sigma &gt; 0</math> </p>	 <p> <math>\epsilon^{vp} = \frac{\sigma - \sigma_y}{\eta_p} t</math> </p>
MADEJKI, 1960	 <p> <math>\sigma = E \epsilon^e = E (\epsilon - \epsilon^{ve})</math> </p>	 <p> <math>\epsilon^{vp} = \frac{\sigma - \sigma_y}{\eta_p} t + \frac{\sigma}{E}</math> </p>
WIERZBICKI, 1963	N/D	
PARASCHKEWM O, 1964 & DIMOV, 1965	N/D	
SALAMON, 1964 & DIMOV, 1965	N/D	
SOBOTKA, 1962	N/D	
CVISC, 2015	<p style="text-align: center;">Courbe du modèle viscoélastique de déformation de Nishihara vs temps</p>  <p style="text-align: center;">Temps (T) [jours]</p> $\epsilon(t) = \frac{p}{K} + \frac{q}{G_M} + \frac{q}{\eta_M} + \frac{q}{G_K} + \left[ 1 - e^{-\left(\frac{G_K}{\eta_K}\right)t} \right] \quad (4.24)$	

### 3.3 Revue des fonctions de charge des lois rhéologiques

D'une manière générale, un géomatériau de comportement rhéologique sous contrainte dépend de la vitesse de la sollicitation et du temps qui intervient de manière implicite à travers l'évolution des paramètres d'histoire (Bingham et Herschel, 2002).

Les modèles élastoplastiques sont caractérisés par l'apparition

- de déformations réversibles ou élastiques ( $\varepsilon = \varepsilon^e$ ) et,
- de déformations irréversibles  $\varepsilon = (\varepsilon^p + \varepsilon^{vp})$

$$[\sigma] = [D] [(\varepsilon) - (\varepsilon_0)] \quad (3.25)$$

Où :  $[\sigma]$  : matrice tenseur de contraintes.

$[D]$  : matrice de flexibilité.

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

$$[D] = \frac{E}{(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(1+\nu)}{2} \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

$$[\varepsilon] = \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{d\delta x}{dx}\right) \\ \left(\frac{d\delta y}{dy}\right) \\ \left(\left(\frac{d\delta x}{dx}\right) + \left(\frac{d\delta y}{dy}\right)\right) \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

Où :  $[\varepsilon]$  : matrice de déformations.

Les déformations se manifestent suivant un taux de déformation.

$$\dot{\varepsilon} = (\dot{\varepsilon}^p + \dot{\varepsilon}^{vp}) = \dot{\varepsilon}_0 (\sigma / \sigma_0)^n \quad (\text{fonction de puissance}).$$

Où :  $\sigma$  : contrainte déviatorique ( $\sigma_v - \sigma_H$ ) ;

$\dot{\varepsilon}$  : taux de déformation ;

$\sigma_0$  : contrainte référence ;

$\dot{\varepsilon}_0$  : taux de déformation référence.

Le développement de l'endommagement d'un massif rocheux (Tableau 4.6) est jugé par des critères de cisaillement, de fracturation et de dilatance.

- Conditions d'endommagement (Deb, 2006) :

$$d\sigma_{ij} = (1-\omega) d\sigma_{ij} + (\omega / 3) \delta_{ij} d\sigma_{kk} \quad (\text{sans dommage})$$

$$d\sigma_{ij} = (1-\omega) d\sigma_{ij} - (\omega / 3) \delta_{ij} d\sigma_{kk} - (\sigma_1 - \sigma_3) d\omega \quad (\text{avec dommage})$$

D'où la Contrainte normale octaédrique :

$$\sigma_{oct} [\text{MPa}]^8 = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3 = (\sigma_{ii} + \sigma_{jj} + \sigma_{kk}) / 3 \quad (3.29)$$

& la Contrainte de cisaillement octaédrique :

$$\tau_{oct} [\text{MPa}]^8 = \frac{1}{3} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_{kk} - \sigma_1)^2]^{1/2} ; \quad (3.30)$$

$$F.S. = \tau_{oct} / \tau_f > 1. \quad (3.31)$$

$$\tau_{oct} > 0.$$

$$\tau_f > b |(\sigma_{moy})|^p$$

$b, p$  : paramètres d'interpolation.

- Conditions de dilatance (Hoeck-Brown., 2002) :

$$F(\sigma_{oct}) / f_3 = (\sigma_{oct}) / f_3)^{k_2} - 1 \quad \text{si } \sigma_{oct} / f_3 > 1 ;$$

$$F(\sigma_{oct}) / f_3 = 0 \quad \text{si } (\sigma_{oct} / f_3) < 1 ;$$

$$f_3 = k - m p ; \quad (3.32)$$

$$\omega = k_1 (1-\omega) ((F(\sigma_{oct}) / f_3) - 1) \quad (\text{paramètre d'endommagement}) \quad (3.33)$$

La Figure 3.4 schématise les différentes zones d'endommagement autour de la cavité du massif rocheux.

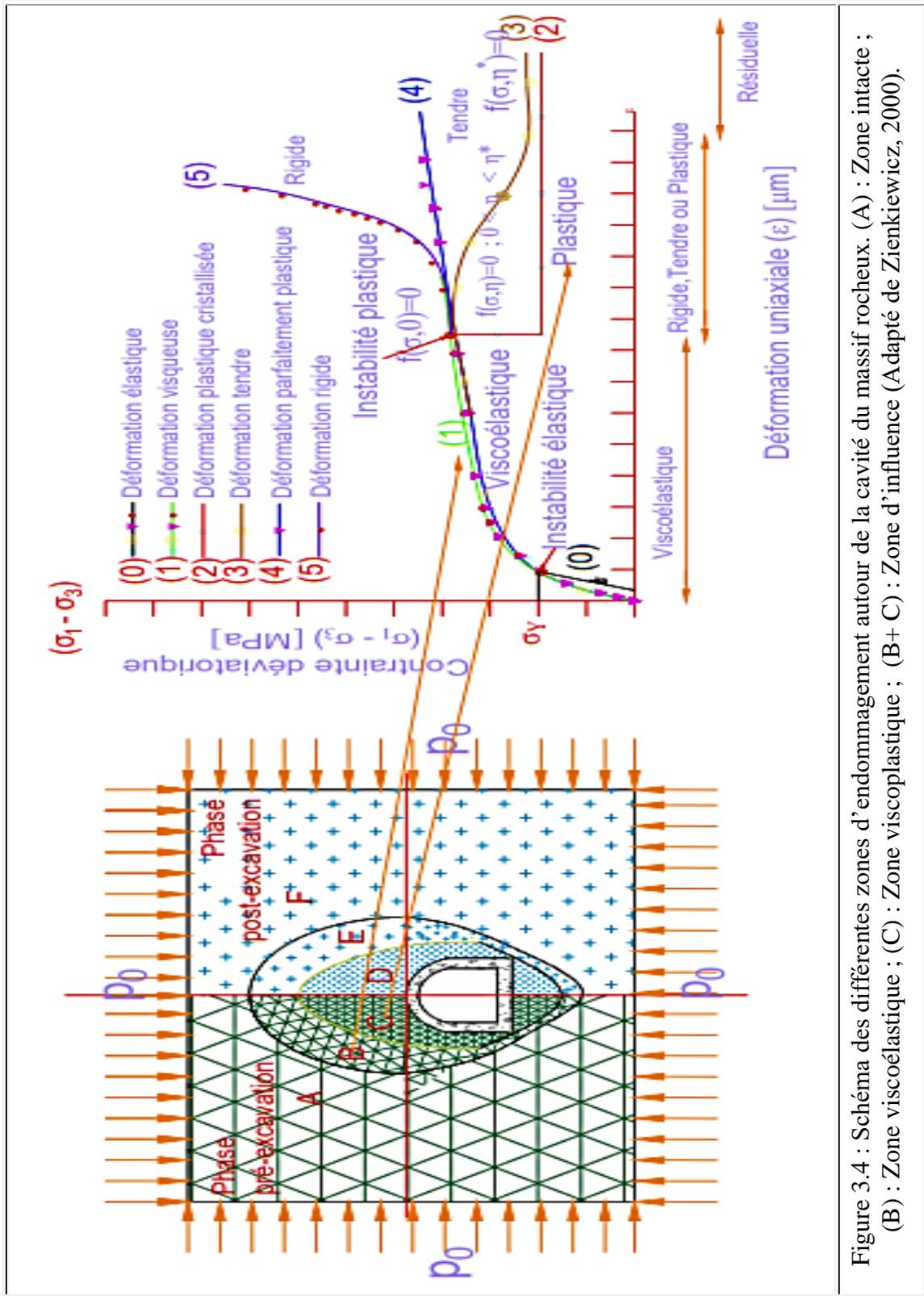


Figure 3.4 : Schéma des différentes zones d'endommagement autour de la cavité du massif rocheux. (A) : Zone intacte ; (B) : Zone viscoélastique ; (C) : Zone viscoplastique ; (B+C) : Zone viscoplastique ; (D) : Zone résiduelle (Adapté de Zienkiewicz, 2000).

Le Tableau 3.6 étudie les vitesses de déformations différées des modèles de lois rhéologiques.

Tableau 3.6 : Revue des taux de déformations différées  
des modèles de lois rhéologiques (Bingham et Herschel, 2002)

LOIS RHÉOLOGIQUE S	TYPES DE MODÈLES $\dot{\epsilon}_i(t) = f(\sigma) \cdot g(\epsilon_i) \cdot h(t)$	PHASES	DÉVELOPPEMENT $\epsilon^i(t) = f(\sigma) \cdot h(\tau)$
Griggs (1939) 1 Param. + 1 var. : A, t	$\dot{\epsilon}_i = A \sigma^m$	Fluage Stationnaire	$\epsilon_i(t) = A \sigma^m t$ Trop simple.
Garafalo (1963) 4 Param. + 1 var. : $\alpha, \beta, \sigma_0, A, \xi(t)$	$\dot{\epsilon}_i = d\epsilon^i/dt = d\xi^\alpha/dt$ $\dot{\epsilon}_i = A(\sinh(\sigma/\sigma_0))^{(\beta/\alpha)}$	Fluage stationnaire	$\epsilon_i(t) = ?$ $\epsilon_i(t) = \xi^\alpha$
Lemaître (1976) 3 Param. + 1 var. : $\alpha, \beta, k, t$	$\dot{\epsilon}_i = A \sigma^m (\epsilon^i)^{-n}$	Écrouissage par la déformation	$\epsilon_i(t) = 10^{-(6)} (\sigma/K)^\beta t^\alpha$ $\epsilon_i(t) = ((n+1)A)^{1/(n+1)} \sigma^{m/(n+1)} t^{1/(n+1)}$ $\alpha = 1 / (n+1); \beta = m / (n+1)$ $K = (10^{6(n+1)} (n+1) A)^{-1/m}$
Weertman (1978) 3 Param. + 1 var. : $\alpha, \beta, k, t$	$\dot{\epsilon}_i = A \sigma^m e^{-(Q/RT)}$	Fluage Stationnaire	$\epsilon_i(t) = \Sigma \epsilon_i = ?$ Complicé.
Aubertin (1987) 15 Param. + 1 var. : A, A <sub>1</sub> , ..., A <sub>5</sub> , B <sub>0</sub> , C, n, N, p, q, R', $\epsilon_0, t$	$\dot{\epsilon}_i = A \left\langle \frac{(\sigma-B)-R}{K} \right\rangle^\alpha \text{sgn}(\sigma - B)$	Fluage Stationnaire	$\epsilon_i(t) = \Sigma \epsilon_i = ?$ Complicé.
Boltzmann (1878) 5 Param. + 1 var. : $\alpha, \sigma_j, A_j, B_j, \sigma$	$f\left(\frac{d\sigma}{dx}\right) = \sum_{j=1}^n f(\Delta\sigma_j) \delta(t - t_j)$ $A_j = B_{j-1}$ et $B_0 = 0$	Approche non-linéaire par rapport au déviateur	$\epsilon_i(t) = \sum_{j=1}^n f(\Delta\sigma_j) (t - t_j)^\alpha$ $\epsilon_i(t) = \int_0^t f\left(\frac{d\sigma(\tau)}{d\tau}\right) (t - \tau)^\alpha d\tau$

### 3.4 Synthèse des critères de modèles de collocation<sup>40</sup>

Dans la littérature, les mécanismes spatio-temporels associés au tunnelage sont la compression, le gonflement et le fluage. Selon Barla (2001), « *la compression est synonyme de cession et de dépendance au temps; il est étroitement lié aux techniques d'excavation et de support qui sont adoptées* ». Cette définition peut prêter à confusion (Paraskevopoulou et Diederichs, 2013) et il est important de noter qu'une composante de compression est fonction de la mise en scène de l'excavation, tandis qu'une autre composante est fonction du temps.

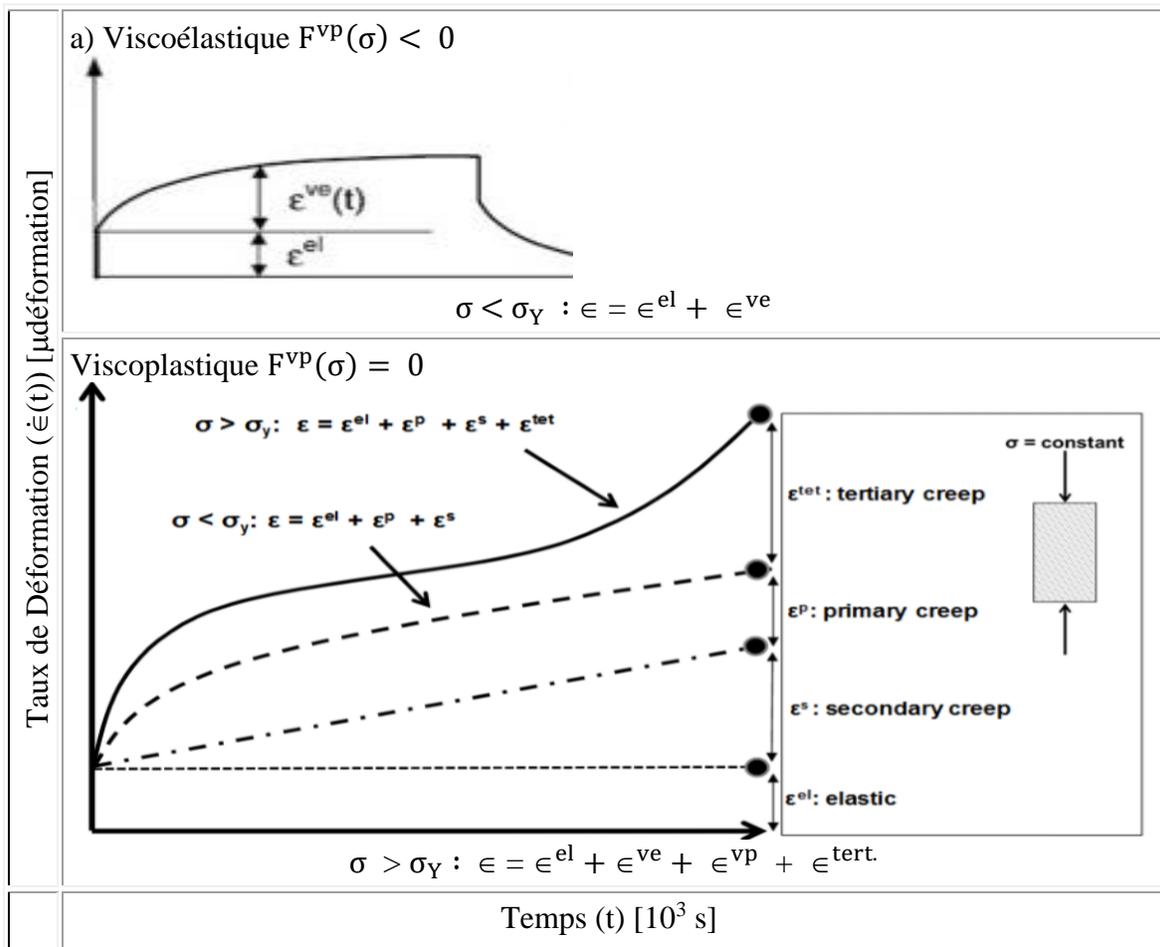


Figure 3.5 : Domaine des surfaces de charge à différentes étapes de fluage (Barla et al., 2012; Paraskevopoulou, 2013)

<sup>40</sup> Modèle de collocation : Synonyme de modèle d'interpolation et/ou d'extrapolation

La Figure 3.5 illustre le domaine des surfaces de charge à différentes étapes de fluage d'un géomatériau.

Le fluage est défini comme la distorsion temporelle de la roche sous une charge soutenue inférieure à la résistance à court terme de la roche. La forme de la courbe de fluage est typique et similaire pour tous les types de roches. Au début, la déformation élastique se produit instantanément, lorsque la charge est appliquée. Ensuite, la charge appliquée est maintenue constante et le taux de déformation diminue cette période est appelée fluage primaire (ou transitoire). Il est à noter que dans certains types de roches, le fluage primaire se rapproche d'une vitesse de déformation constante (vitesse quasi constante) qui détermine la transition vers le fluage secondaire (ou stationnaire). À la fin de cette étape, le matériau échoue rapidement lorsque la vitesse de déformation commence à s'accélérer. C'est ce qu'on appelle le fluage tertiaire (ou accéléré) et c'est une caractéristique de chaque type de roche (Barla, 2001).

La majorité des modèles et formulations ont une tendance commune à se concentrer principalement sur la représentation du stade primaire et secondaire de fluage, négligeant ainsi la simulation du stade tertiaire de fluage au cours duquel les déformations s'accroissent soudainement conduisant à une défaillance rapide. On voit qu'il n'y a pas de modèle simple qui peut décrire de manière satisfaisante le comportement de fluage à travers les trois étapes et peut être utilisé pour tous les types de roches et toutes les conditions in situ sans limitations.

Les critères de modèles de collocation sont basés sur cinq notions fondamentales :

- La surface de charge ( $F(\sigma_{ij}, \lambda, A_i) = 0$ ).
- La règle d'érouissage isotrope ( $\lambda$ ) ou cinématique ( $A_i$ ).
- La règle d'écoulement ( $\sigma_y = \sigma_{ij}^e$  et  $\varepsilon_y = \varepsilon_{ij}^{\text{élastique}}$ ).
- Le critère de rupture ( $\sigma_{cr} = \sigma_{ij}^p$  et  $\varepsilon_{cr} = \varepsilon_{ij}^{\text{irréversible}}$ ).
- La Contrainte normale octaédrique  $\sigma_{oct} [\text{MPa}]^8 = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 / 3) = (\sigma_{ii} + \sigma_{jj} + \sigma_{kk} / 3)$

Trois (3) cas illustrés selon les Figures 4.5 et 4.6 se présentent :

- Si  $F < 0$  État correspondant à l'intérieur du domaine élastique.
- Si  $F = 0$  État correspondant à la frontière du domaine élastique.
- Si  $F > 0$  État correspondant à l'extérieur du domaine élastique.

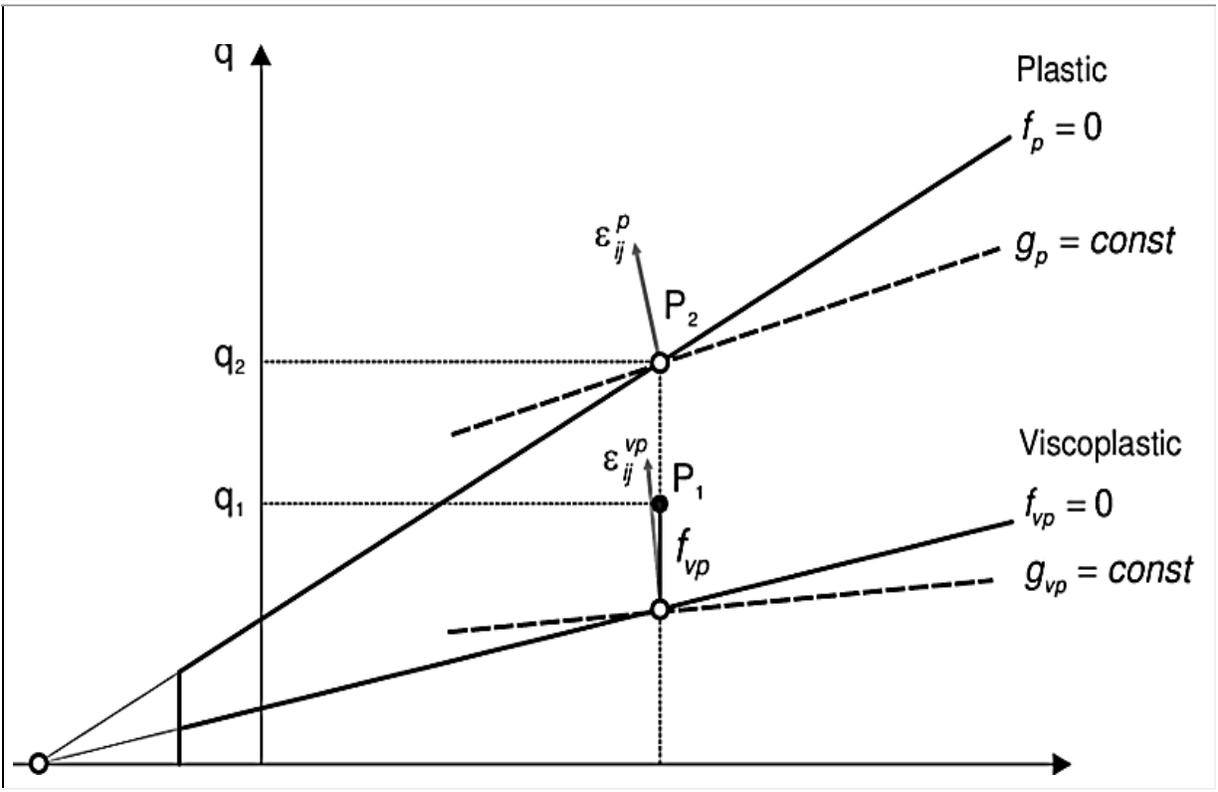
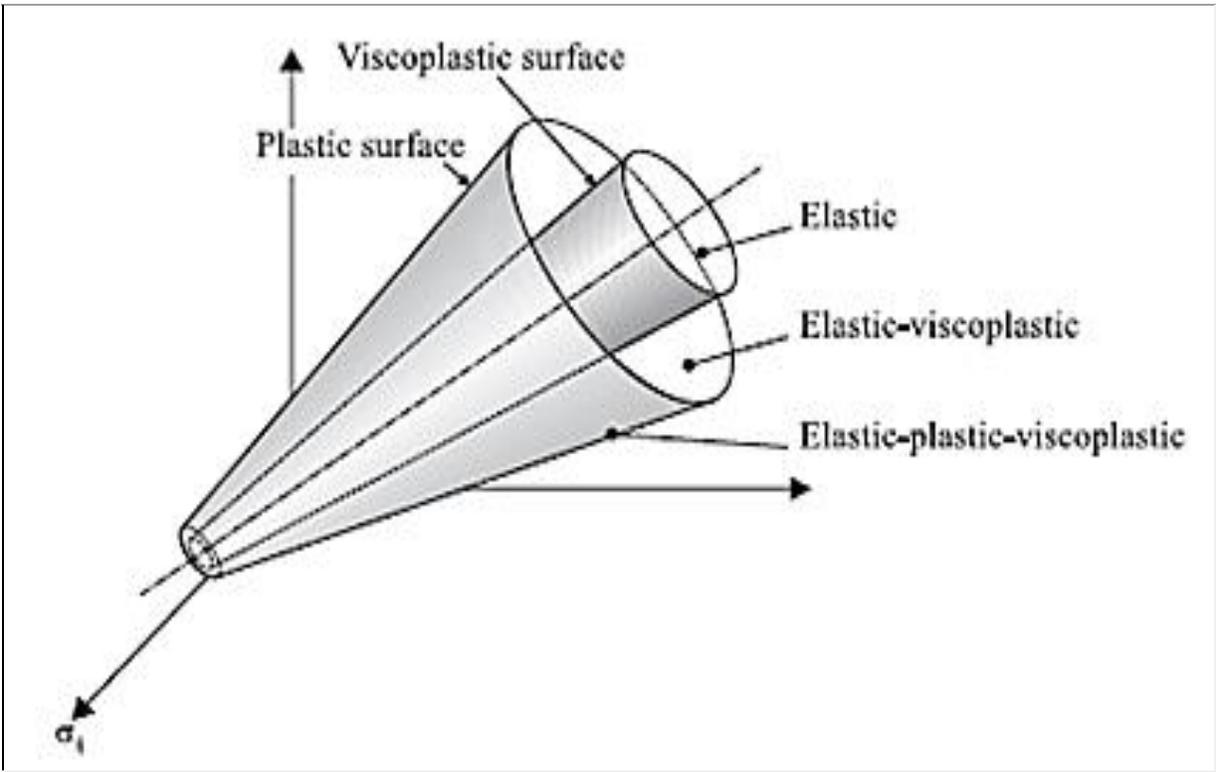


Figure 3.6 : Frontières des surfaces et des contraintes dans le plan p-q pour les contraintes du modèle viscoplastique (Barla, 2001 et Debernardi, 2008)

Selon Barla et al. (2012), « *le comportement mécanique du massif rocheux devrait être modélisé avec des lois de comportement viscoplastiques appropriées, qui ne tiennent compte explicitement que de la dépendance au temps* ». Ces modèles devraient simuler la dépendance au temps en développant des déformations viscoplastiques (irréversibles) uniquement dans certaines combinaisons de conditions de contraintes et de propriétés mécaniques visqueuses des matériaux rocheux.

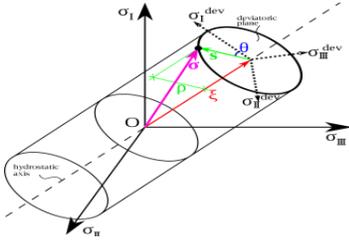
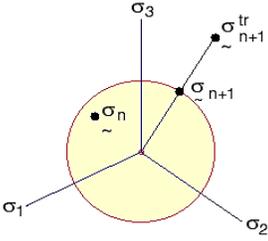
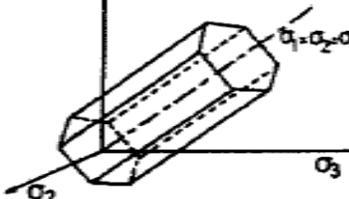
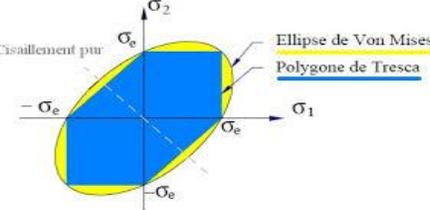
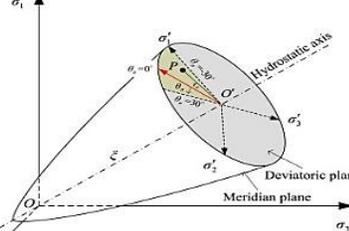
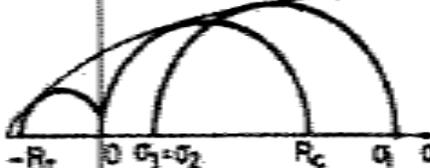
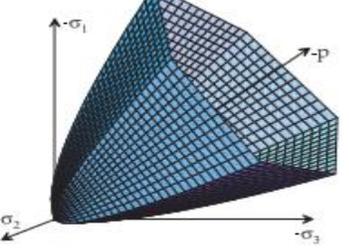
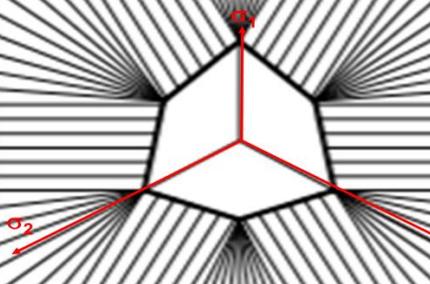
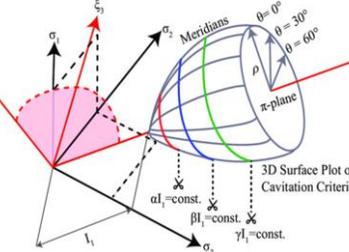
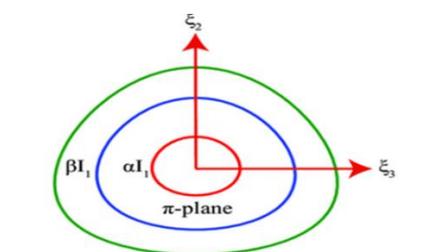
En revanche, il est couramment observé que les modèles élastoplastiques se produisent lorsque la relaxation temporelle ou la dégradation de la résistance se produit, en réduisant soit la rigidité ou la résistance au cisaillement ou la cohésion du matériau. Paraskevopoulou et al. (2012) indiquent que « *ces modèles peuvent être problématiques lorsqu'ils sont utilisés pour simuler un comportement dépendant du temps* ». Cette méthode, cependant, est généralement adoptée en raison de sa simplicité. Ce dernier met en évidence la nécessité d'étalonner et de valider les modèles viscoplastiques mentionnés ci-dessus avec des données de tunnelage réelles et des études de cas spécifiques. Par conséquent, « *des tests de surveillance sont effectués pendant la construction du tunnel pour fournir des données pour l'analyse rétrospective du comportement au fluage* » (Bonini et al., 2001 et 2009).

La plupart des formulations de fluage dans la roche suggérée dans la littérature peuvent être divisées en trois catégories principales :

- a) soient elles sont fonctions de fluage empiriques basées sur l'ajustement de courbe de données expérimentales;
- b) soient elles sont fonctions de fluage rhéologique basées sur des modèles de comportement du fluage;
- c) les théories générales, qui sont considérées comme les aspects les plus avancés de la modélisation numérique, ne sont pas limitées à des cas spécifiques et peuvent être implémentées dans divers codes d'analyse numérique (c'est-à-dire les codes d'éléments finis et de différences finies).

Le Tableau 3.7 synthétise les principales fonctions de charge des lois rhéologiques.

Tableau 3.7 : Revue des fonctions de charge des lois rhéologiques  
(Adapté de Purwodihardjo, 2004)

CRITÈRE DE RUPTURE	RÉPRÉSENTATION SPATIALE 3 D	DÉTAILS
<p>VON MISES (1913) 3 Paramètres: E, <math>\nu</math>, K</p>	 <p><math>\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3</math></p>	
<p>TRESCA (1864) 4 Paramètres: E, <math>\nu</math>, c, <math>\psi</math></p>	 <p><math>\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3</math></p>	 <p>Cisaillement pur <math>\sigma_e</math> <math>-\sigma_e</math> <math>\sigma_e</math> <math>-\sigma_e</math></p> <p>Ellipse de Von Mises Polygone de Tresca</p>
<p>DRUCKER PRAGER (1952) 5 Paramètres: E, <math>\nu</math>, K, <math>\alpha</math>, <math>\beta</math></p>	 <p><math>\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3</math></p>	<p>Critère parabolique</p>  <p><math>-\sigma_e</math> <math>\sigma_e</math> <math>-\sigma_e</math> <math>\sigma_e</math></p>
<p>MOHR-COULOMB (2013) (M-C modifié par Montès) 5 Paramètres: E, <math>\nu</math>, c, <math>\phi</math>, <math>\psi</math></p>	 <p><math>\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3</math></p>	
<p>HOEK-BROWN (2002) (M-C modifié par H-B) 6 Paramètres: E, <math>\nu</math>, c, <math>\phi</math>, <math>\psi</math>, D</p>	 <p><math>\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3</math></p>	 <p><math>\beta I_1</math> <math>\alpha I_1</math> <math>\pi</math>-plane</p>

Il est à remarquer pour le :

- Critère de Von mises (Tableau 3.8, # 1) :

La règle d'écoulement est associée, le potentiel est confondu avec la fonction de charge ( $G=F$ ). L'élasticité associée est l'élasticité linéaire, isotrope de Hooke.

- Critère de Tresca (Tableau 3.8, # 2) :

La contrainte principale intermédiaire ne joue aucun rôle comme dans le critère de Coulomb.

- Critère de Druger Prager (Tableau 3.8, # 3) :

L'élasticité associée est linéaire, isotrope de Hooke. Les angles de frottement en compression sont limités à des valeurs faibles dans le cas des sables. Ce critère n'est pas adapté à la modélisation des sables (roches).

- Critère de Mohr-Coulomb (M-C) (Tableau 3.8, # 4) :

Le critère de Mohr Coulomb ne fait pas intervenir la contrainte intermédiaire  $\sigma_2$ . L'angle de frottement est le même en compression ( $\sigma_2 = \sigma_3$ ) et en extension triaxiale ( $\sigma_2 = \sigma_3$ ).

- Critère de Hoek-Brown (H-B) (Tableau 3.8, # 5) :

Le seul critère valable autant pour les sols que pour les massifs rocheux. Évidemment, c'est notre choix pour le modèle contributif à développer.

### 3.5 Discussions & conclusion

Les modèles empiriques (Aydan et al.1996; Sign et al.1997; Hoek, 2001) sont dérivés de données de tests pour certains types de roches et peuvent être utilisés comme premier outil de conception préliminaire, mais sont d'une application limitée pour d'autres types de roches. D'une part, les modèles viscoélastiques (à plusieurs corps) s'identifient à partir de l'allure de la courbe du Module de complaisance<sup>41</sup> versus le Temps. La Figure 3.7 illustre les différentes caractéristiques de ces modèles.

---

<sup>41</sup> Le Module de complaisance ( $J$ ) est l'inverse du Module de Young ( $E$ ) . D'où :  $J(t) = \epsilon(t) / \sigma(t) = 1 / E(t)$ .

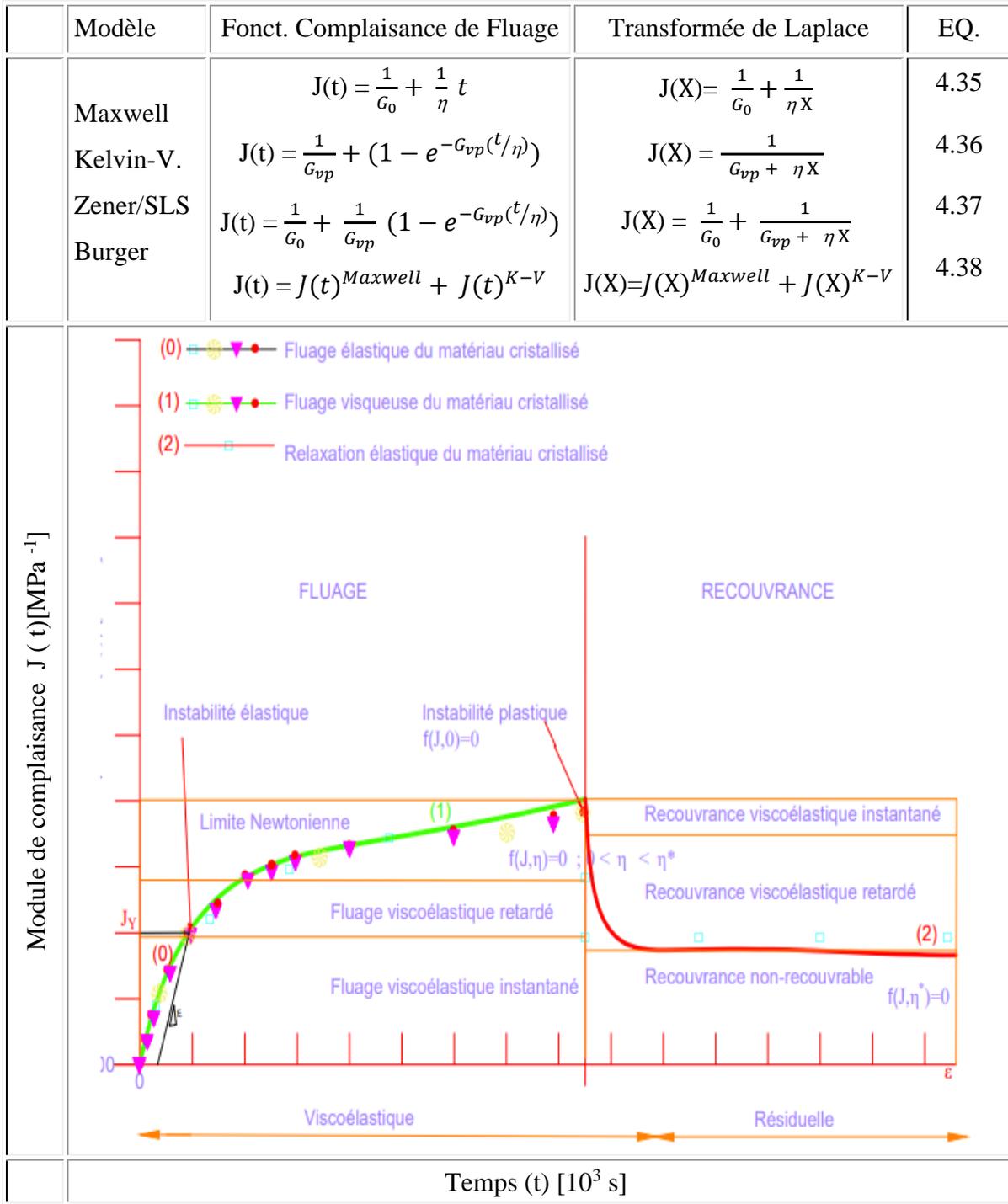


Figure 3.7 : Caractéristiques générales de la déformation de modèles viscoélastiques – t : temps (paramètre du modèle développée) et X : Amplitude de déplacement (paramètre transformé par la transformée de Laplace). Adapté de Lemaître et Chaboche, 1988.

Nous déduisons que la déformation de modèles viscoélastiques a des limites. Elles sont soit : a) constante, b) totalement élastique, c) viscoélastique, d) totalement visqueuse. De façon spécifique : le modèle Hooke est parfaitement élastique. Le modèle Newton est parfaitement visqueux. Le modèle Maxwell prédit la limite d'une fluidisation, mais ne décrit pas la recouvrance. Le modèle Kelvin-Voigt prédit la limite d'une solidification, mais ne décrit pas la relaxation. Le modèle Poynting-Thompson ou de Zener à trois paramètres est linéaire standard.

D'autre part, la déformation des modèles viscoplastiques sont non linéaires (Zhang, 2017 et Yang, Large, Bull, 2004). Dans l'ensemble, la plupart des formulations évoquées sont considérées comme des représentations mathématiques des données expérimentales qui n'intègrent pas les mécanismes à l'origine du comportement observé. De plus, la plupart des modèles proposés pour décrire la dépendance au temps sont principalement axés sur les roches tendres (comme Malan, 2002). Les massifs rocheux, présentant des déformations et dépendant du temps, ont des applications peu limitées. De plus, la plupart des modèles dépendant du temps ont été développés pour reproduire le comportement de fluage négligeant dans le processus certains paramètres contribuant à l'accumulation de contraintes conduisant à une défaillance. En conclusion, la plupart des modèles de fluage ne peuvent satisfaire que certaines conditions et certains états. Le besoin d'enquêter sur les mécanismes et les différents processus dépendant du temps, sont mis en évidence.

De par ces discussions sur l'identification de matériaux, la décision n'est que de proposer le développement d'un modèle viscoélastique contributif de quatre éléments analogue à CVISC (modèle développé utilisé dans le code FLAC. Le modèle CVISC, présenté dans le Tableau 3.8, consiste en un modèle de Burgers en série avec un curseur. Le composant coulissant qui est un élément en plastique est utilisé pour capturer l'état tertiaire de fluage, c'est-à-dire l'état de défaillance que Burgers ne parvient pas à capturer. L'extension de viscoélastique à viscoplastique du modèle de Burgers contribue à simuler la rupture précédente lorsque les conditions de contraintes se rapprochent de la limite d'élasticité. Il est l'exemple-type qui servira de base dans le cadre de l'étude.

Ce modèle ciblé sera de type viscoplastique avec un écrouissage positif. Il dépendra aussi de l'endommagement et se basera sur les quatre notions fondamentales telles que :

- a) La surface de charge ( $F(\sigma_{ij}, A_i) = 0$ ).
- b) La règle d'écrouissage cinématique ( $A_i$ ).
- c) La règle d'écoulement ( $\sigma_y = \sigma_{ij}^e$  et  $\epsilon_y = \epsilon_{ij}^{\text{élastique}}$ ): élasto-viscoplastique.
- d) Le critère de rupture ( $\sigma_{cr} = \sigma_{ij}^p$  et  $\epsilon_{cr} = \epsilon_{ij}^{\text{irréversible}}$ ) : Hoek-Brown.

Ayant :

- 5 paramètres + 1 variable :  $\alpha, \sigma_j, A_j, B_j, \sigma(t)$  où  $A_j = B_{j-1}$  et  $B_0 = 0$ .
- $\dot{\epsilon}_i(t) = f(\sigma) \cdot g(\epsilon_i) \cdot h(t)$ , non-linéaire par rapport à la vitesse du déviateur ;

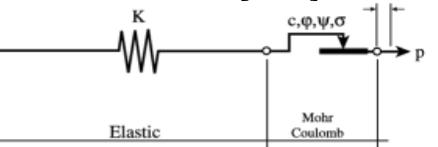
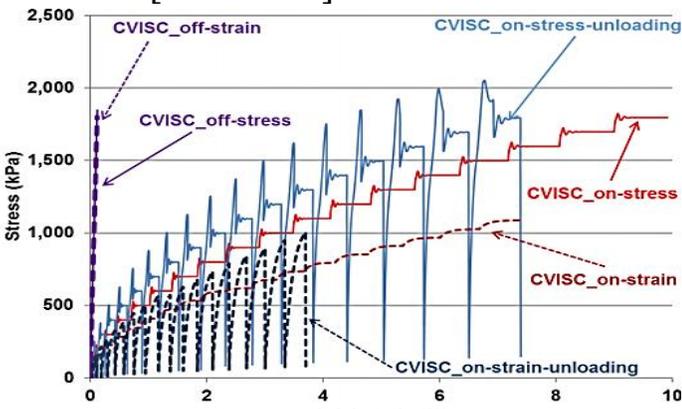
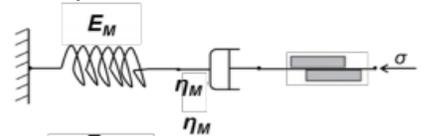
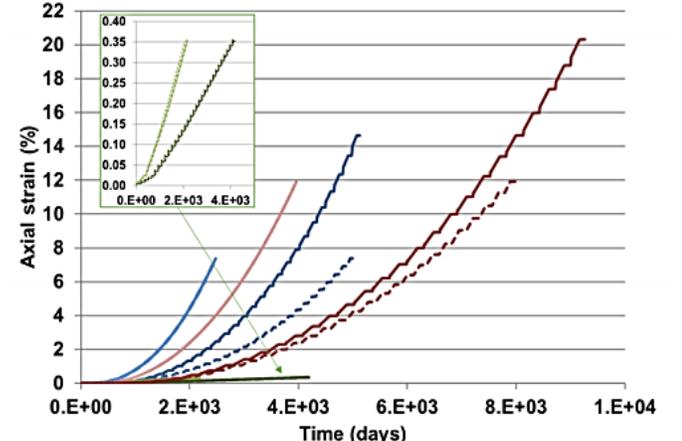
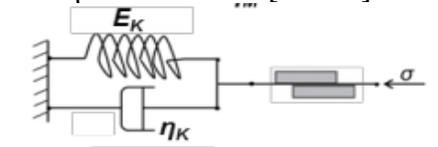
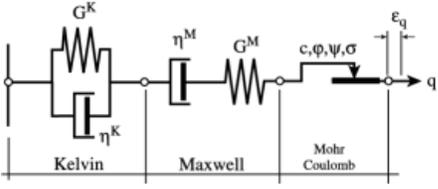
$$f\left(\frac{d\sigma}{dx}\right) = \sum_{j=1}^n f(\Delta\sigma_j) \delta(t - t_j) \quad (4.38)$$

- développé selon Fourier tel que :

$$\epsilon_i(t) = \sum_{j=1}^n f(\Delta\sigma_j) \langle (t - t_j)^\alpha \rangle ; \quad \dot{\epsilon}_i(t) = \int_0^t f\left(\frac{d\sigma(\tau)}{d\tau}\right) (t - \tau)^\alpha d\tau \quad (4.39)$$

Le fluage viscoplastique se manifeste comme une augmentation progressive de la déformation avec le temps; un arrangement avec l'élément de Saint-Venant. En outre, l'élément en plastique (Saint-Venant) doit être couplé à un amortisseur visqueux pour être considéré comme dépendant du temps ou viscoplastique. Ce qui fait la robustesse du modèle CVISC est dû à sa construction avec un patin en série (avec le respect du principe d'additivité des déformations). Il en sera de même pour le modèle ciblé. À cet effet, une analyse du modèle CVISC de prime abord sera réalisée et présentée pour des conditions souterraines. Et une simulation préliminaire d'un cas du tunnel à l'étude sera numériquement fait à l'aide de FLAC.

Tableau 3.9 : Caractéristiques du modèle CVISC (Adapté de Itasca, 2016)

<p>SCHÉMAS-BLOCS DE MODÈLES RHÉOLOGIQUES ANALOGUES À CVISC (Diederichs et al. 2013)</p>	<p>• Équations de déformations longitudinales d'un matériau élasto-viscoplastique de type CVISC (Diederichs et al. 2013)</p>
<p>• CVISC_off Comportement volumétrique D'après Barla (2010): <math>K = E_0 = G_0</math> [MPa]</p> 	<p>(a) ÉQUATION <math>f = f(t, \sigma, \epsilon)</math> dans le plan <math>\sigma</math> vs <math>t</math></p> $\epsilon(t) = \frac{\sigma}{E_M} + \left[ 1 - e^{-\frac{E_K}{2\eta_K} t} \right] \quad (4.40)$  <p style="text-align: right;">Script FLAC</p>
<p>• CVISC_on Maxwell M : modèle Maxwell D'après Barla (2010) : <math>K_M = E_M = 566</math> [MPa] <math>\eta_M = 8.82 \cdot 10^8</math> [MPa-s]</p> 	<p>(b) ÉQUATION <math>f = f(t, p, q, \epsilon)</math> dans le plan <math>p</math> vs <math>q</math></p> $\epsilon(t) = \frac{p}{K} + \frac{q}{G_M} + \frac{q}{\eta_M} + \frac{q}{G_K} + \left[ 1 - e^{-\left(\frac{G_K}{\eta_K}\right)t} \right] \quad (4.42)$  <p style="text-align: right;">Script FLAC</p>
<p>• CVISC_on Kelvin-Voigt K : modèle Kelvin D'après Barla (2010) : <math>K_G = G_K = 498</math> [MPa] <math>\eta_K = 1.34 \cdot 10^8</math> [MPa-s]</p> 	<p>• CVISC_on (Comportement déviatorique)</p> 

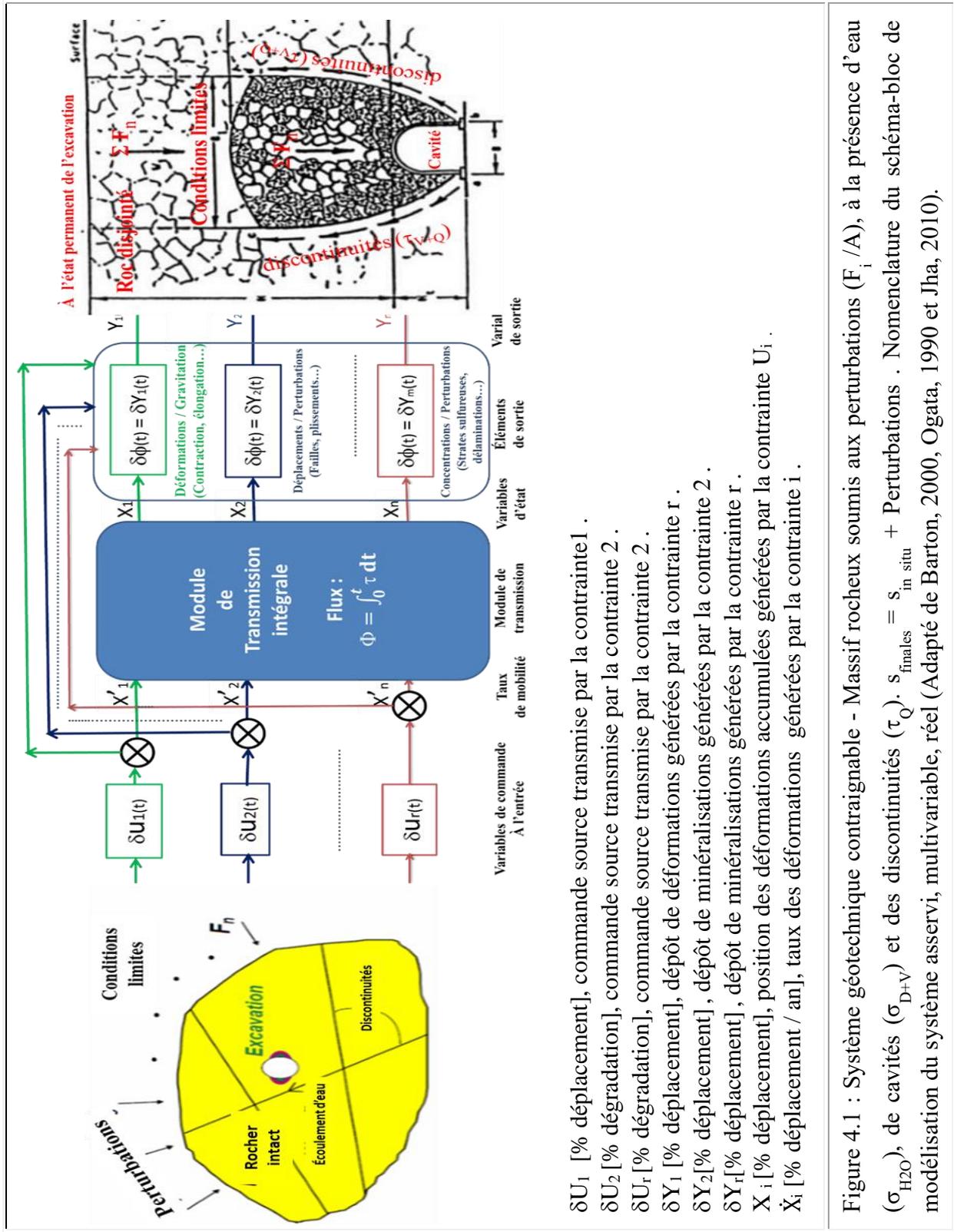


## **DEUXIÈME PARTIE**

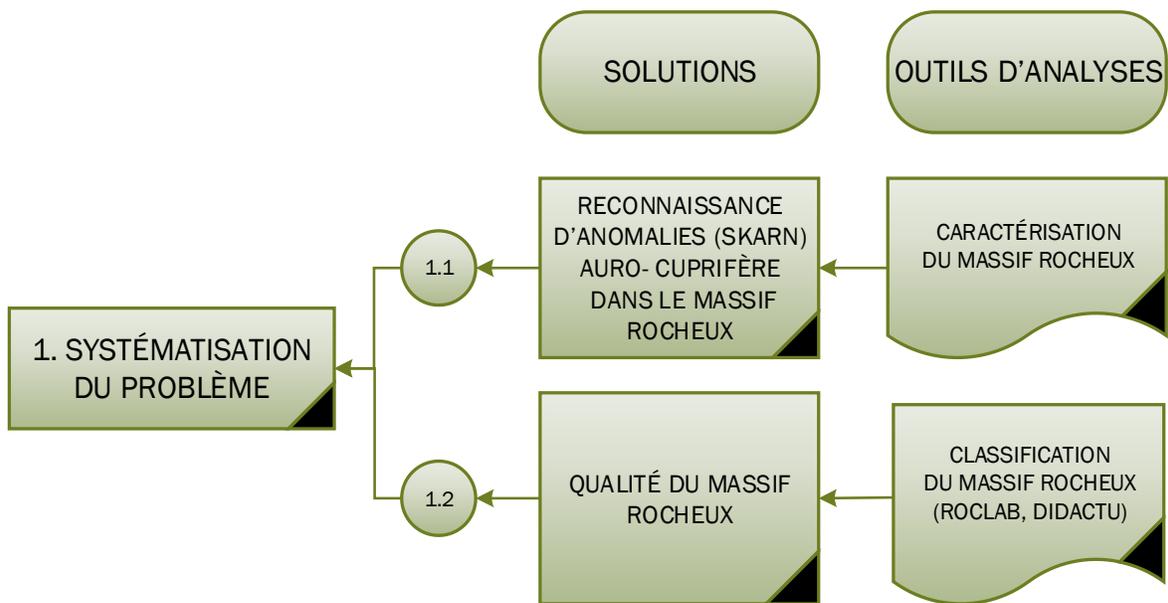
### **SYSTÉMATISATION DU PROBLÈME GÉOMÉCANIQUE**

Un système est un ensemble d'éléments en interaction dynamique organisés en fonction d'un but (De Rosnay, 1995). Tout ce qui n'appartient pas au système fait partie de l'environnement. Ce qui constitue le système dépend du point de vue de l'observateur (Akhric, 2017). S'inspirant de cette définition annotée, un choix s'impose d'évaluer la mine Sedren sous la forme d'un système couplé avec deux composantes systémiques : l'environnement et l'infrastructure (galeries minières) en béton (Figure 4.1 ). La problématique est de nature géotechnique. L'objectif fixé est de résoudre le problème de l'instabilité physique. Le découplage est source d'erreurs. Néanmoins, on accepte de compenser l'erreur avec l'ajout de considérations des perturbations environnementales (effort tranchant de cisaillement,  $(V)$  et moment fléchissant de sismicité  $(M = Q \cdot d$  où  $Q$  : sollicitation et  $d$  : bras de levier) qui produit de la dégradation.

Dans ce processus de systématisation, il est à noter que la caractérisation de l'évolution de l'état de ce système se fera dans un cadre spatio-temporel. De ce fait, cette deuxième partie de la thèse est une suite logique qui consistera à systématiser et à concevoir de façon mécanique la problématique réelle en tenant compte de toutes les interactions.



Le diagramme logique et fonctionnel tel qu'illustré ci-contre (Figure 4.2). explique le procédé de systématisation de l'instabilité de Sedren.



Script Visio, 2022

Figure 4.2 : Méthodologie de systématisation de l'instabilité de Sedren  
(Adaptation de Ostertag, 2006 et Akhrif, 2017)

Par conséquent, nous réalisons :

- un système physico-chimique couplé qui mettra en perspective la dynamique des éléments de la mine Sedren.

Puis, à des fins de l'étude :

- un système physique simplifié équivalent remplacera le système couplé qui reflétera la réalité géotechnique.



## **CHAPITRE 4**

### **ÉTUDE DU GÉOSYSTÈME DE SEDREN**

Une conception durable d'un ouvrage minier exige une connaissance du comportement du massif rocheux auquel cet ouvrage est destiné. Cette connaissance permet de quantifier la stabilité du massif rocheux et, donc, d'assurer la sécurité des travailleurs et d'optimiser les procédés miniers.

#### 4.1 Caractérisation géomécanique du massif rocheux de Sedren

Le comportement est influencé par le réseau de joints et de discontinuités présents dans la structure géologique du massif rocheux. La configuration du réseau de lignes (traverse) est montrée à la Figure 4.3.

Il en découle que la connaissance des caractéristiques des discontinuités est primordiale dans l'atteinte des objectifs d'une bonne conception des ouvrages miniers. De ce fait, cette étude vise à étudier le potentiel d'applicabilité de l'analyse d'images dans la caractérisation géomécanique du massif rocheux de Sedren. Avec l'avènement des techniques de numérisation des images, des algorithmes puissants de traitement des images ont été mis au point et sont actuellement utilisés pour cette application scientifique et industrielle.

Deux approches ont été proposées afin de procéder au relevé des discontinuités géologiques par le traitement d'images numériques. La première approche consiste à détecter les traces de discontinuités interceptant un forage (Côté, 2000; Lemy et al., 2001). La seconde méthode est la reconnaissance des traces créées par l'intersection entre une paroi rocheuse et un réseau de discontinuités.

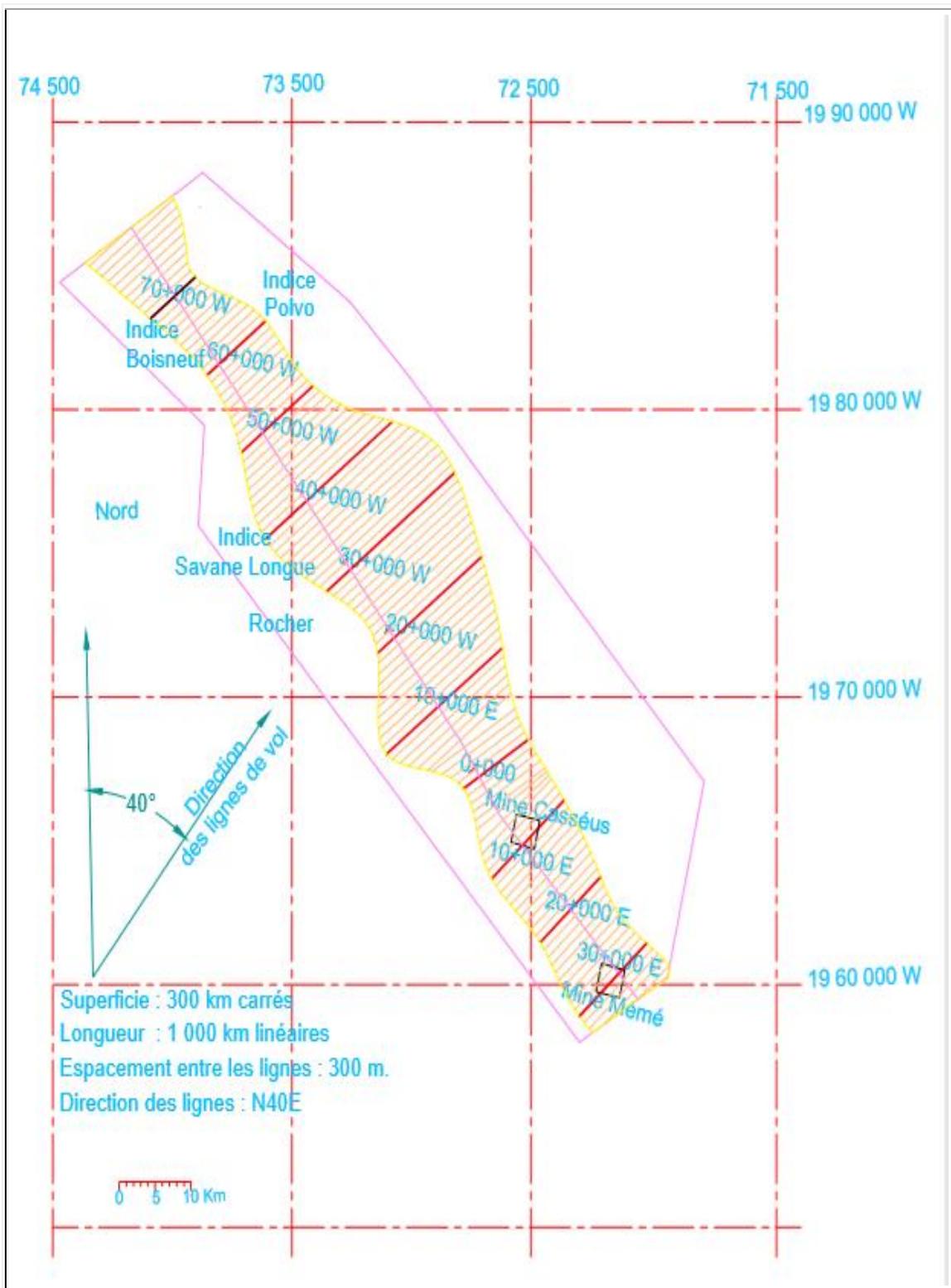


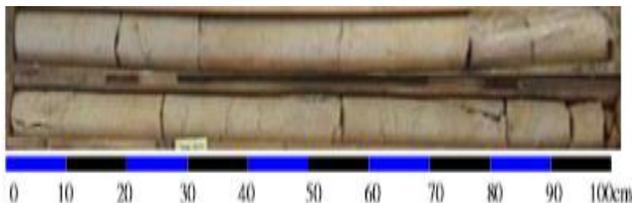
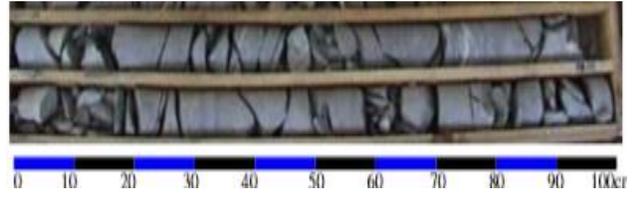
Figure 4.3 : Coupe géologique illustrant les lignes entrecoupées de la structure géologique.

Échelle 1 : 20 000 ; Mazarin, Inc., 1996, Pubellier et al., 2000, Sodemine 2018.

#### 4.1.1 Caractérisation par des méthodes traditionnelles

Le code Dictatu est utilisé pour des calculs dans cette étude. L'algorithme de détection identifie efficacement la trace des discontinuités sur des carottes de forage à partir d'images numériques. Suite à la détection, il est en mesure de calculer divers paramètres utiles tels le RQD (Deere, D.U. et Deere, D.W. , 1988), le taux de récupération de la carotte et la fréquence des joints. Voir Tableau 4.1 et Annexe D pour des détails. L'algorithme de détection ainsi développé fait l'objet d'une implantation logicielle. Il est assujéti à plusieurs caractéristiques propres aux logiciels informatiques tels la convivialité, la robustesse, la facilité d'utilisation. Il supporte les formats de fichiers courants tant en lecture qu'en écriture.

Tableau 4.1 : Carottes prélevées dans la région Sedren (Sodemine 2011)

Localisation des carottes	Identification des carottes
	 <p>(a) Calcaire altéré Carotte T localisée à 0+880 km</p>
	 <p>(b) Roches intrusives Carotte T localisée à 0+130 km</p>
<p>Vues de la vallée de Terre Neuve à partir du chemin conduisant au prospect de la mine Mémé de Sedren</p>	 <p>(c) Argile schisteuse Carotte T localisée à 0+180 km</p>

#### 4.1.2 Caractérisation par analyse d'images

Dans une perspective d'acquisition de données rapide et sécuritaire des caractéristiques propres aux joints, aux discontinuités, la systématisation du problème à l'aide d'analyse d'images est un outil important dans la caractérisation géomécanique du massif rocheux. Une première caractérisation géomécanique du massif rocheux est réalisée à l'aide de carottes de forage et, lorsque les excavations minières sont accessibles (Figure 4.2). Cette première caractérisation est complétée par le relevé des joints et des discontinuités sur les parois rocheuses. Cependant, l'acquisition des données géomécaniques des discontinuités est sujette à la productivité des opérations minières et la stabilité, et la sécurité qui en découle, des chantiers miniers. Cette deuxième partie est une suite logique qui consiste à systématiser et à concevoir de façon mécanique la problématique réelle en tenant compte de certaines interactions nécessaires. Des photographies de carottes de forage ont été prises dans un environnement contrôlé afin de développer une méthode standard d'acquisition photographique. En outre, des photographies de parois rocheuses ont été prises lors de campagne de relevés par traverse des discontinuités reflétant ainsi les véritables conditions photographiques présentes sur les lieux. Elles ont été utilisées dans l'élaboration de l'algorithme de détection et de mesure, et d'élaboration suivant les étapes de l'analyse d'images de la trace des discontinuités dans l'étude comportementale de différents détecteurs appliqués à des parois rocheuses. Parallèlement à l'élaboration de l'algorithme de détection, une évaluation de la performance des détecteurs est effectuée en situation réelle. Les images numériques des parois rocheuses proviennent de photographies prises sur le terrain lors de sondages (relevés) afin de minimiser le biais introduit par un faible échantillonnage de données. Voir des photos et données prises à l'Annexe D. Dans ce domaine particulier de la mécanique des roches, l'analyse d'images apporte une solution aux contraintes de productivité et de sécurité imposées par les procédés miniers.

#### 4.2 Systématisation du problème

La théorie de modélisation mathématique de systèmes multivariables réels (Hurteau et al., 1980) colle bien à la Figure 4.4 (Adapté de Barton, 2000, Ogata, 1990 et Jha, 2010) et répond bien à notre problème réel de nature géophysico-chimique.

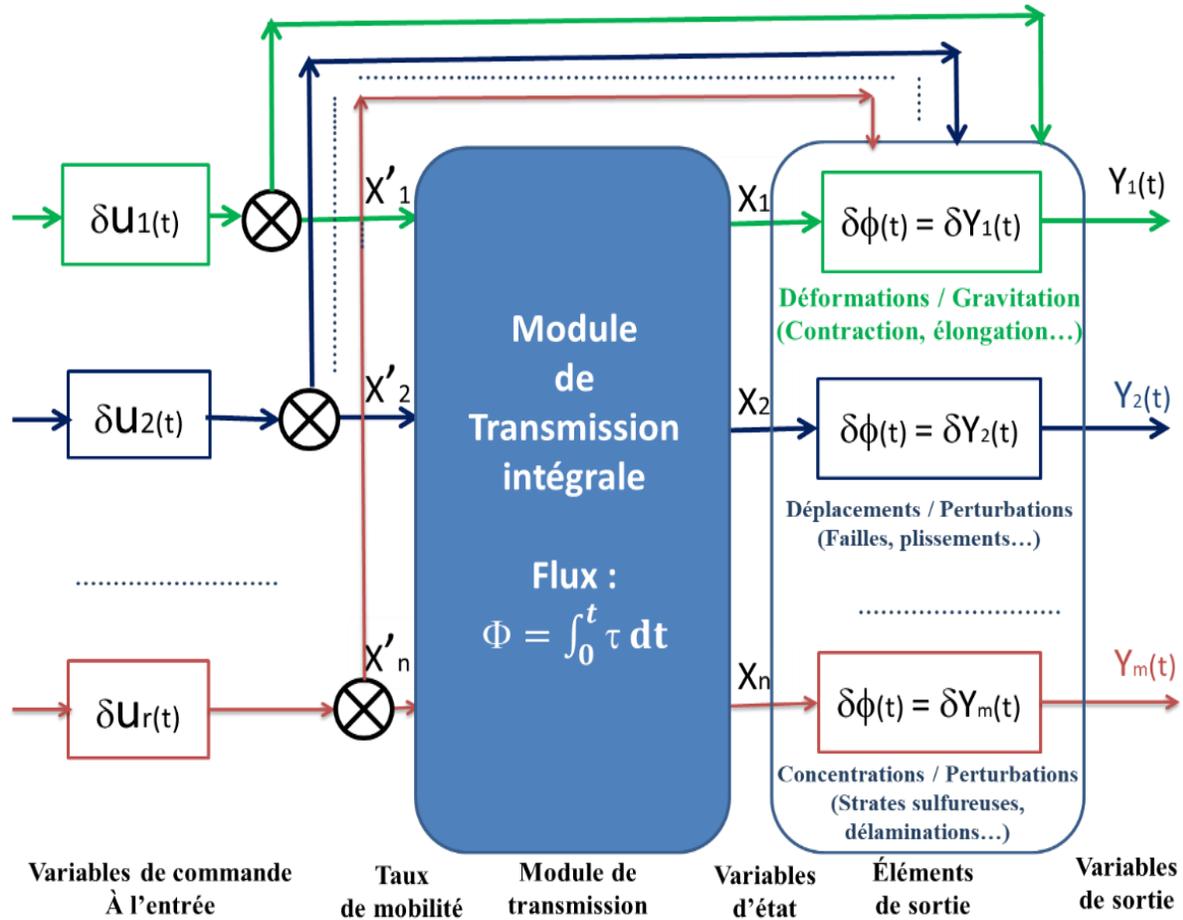


Figure 4.4 : Schéma-bloc de système asservi, multivariable, réel de Sedren (Adapté de Ogata, 1990)

où

$\delta U_1$  [% déplacement], commande source transmise par la contrainte 1.

$\delta U_2$  [% dégradation], commande source transmise par la contrainte 2.

$\delta U_r$  [% dégradation], commande source transmise par la contrainte 2.

$\delta Y_1$  [% déplacement], dépôt de déformations générées par la contrainte r .

$\delta Y_2$  [% déplacement] , dépôt de minéralisations générées par la contrainte 2 .

$\delta Y_r$  [% déplacement] , dépôt de minéralisations générées par la contrainte r .

$X_i$  [% déplacement], position des déformations accumulées générées par la contrainte  $U_i$ .

$\dot{X}_i$  [% déplacement / as], taux des déformations générées par la contrainte  $i$  .

### 4.3 Méthode d'acquisition de données géomécaniques

Un site minier fut visité : la mine Sedren. Lors des visites, des campagnes d'acquisition de données ont permis de caractériser adéquatement la fracturation des deux sites d'étude Mémé et Casséus.

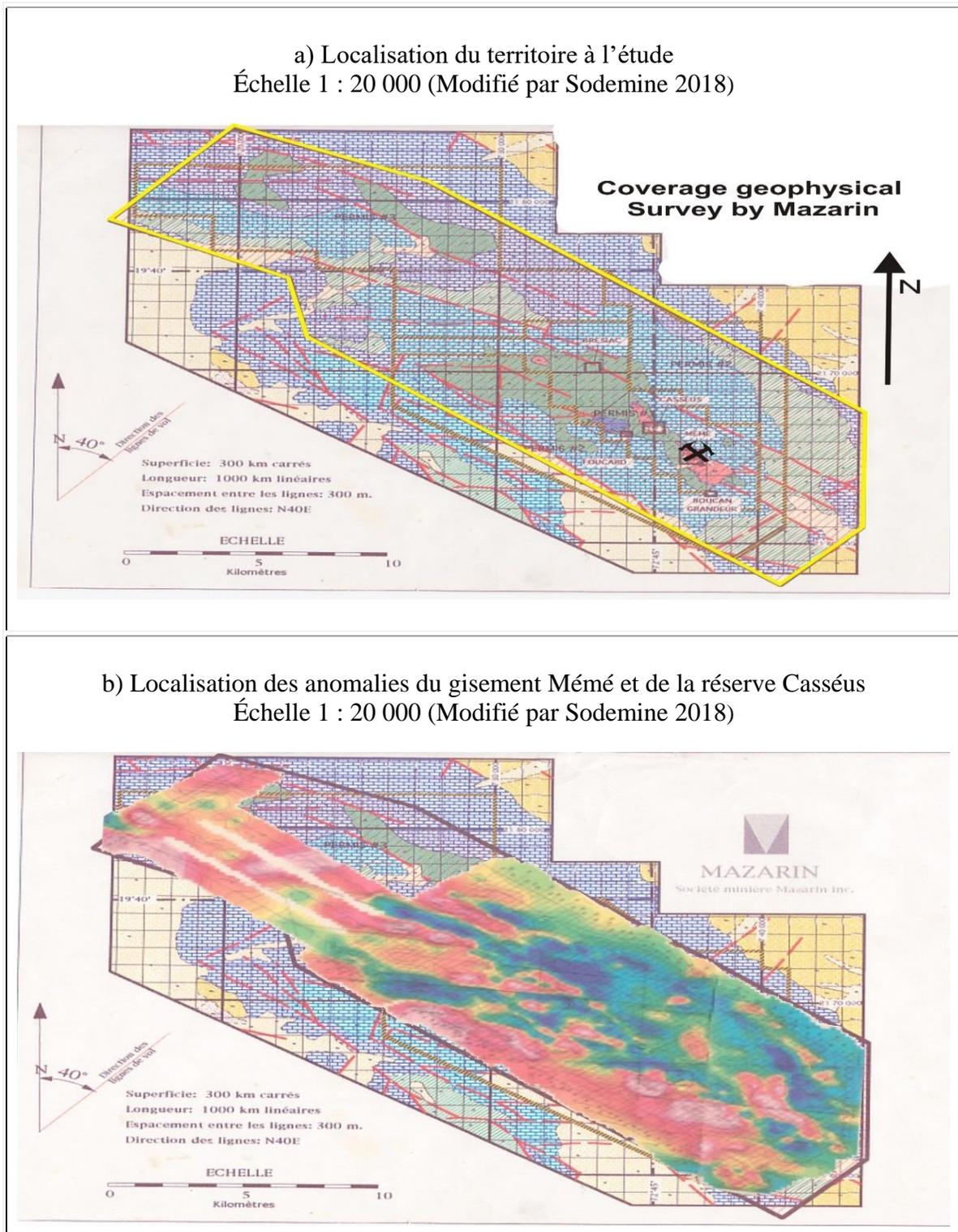
La connaissance du comportement du massif rocheux est nécessaire à l'optimisation et à la sécurité d'un chantier. Le comportement du massif rocheux découle de la présence du réseau de discontinuités. La caractérisation géomécanique du massif rocheux permet de connaître les propriétés structurelles des discontinuités tels le pendage, la direction, l'espacement, la longueur trace, la rugosité, etc. De ces propriétés, certains paramètres utiles peuvent être calculés. Le RQD (de Deere et al., 1967) est mesuré sur une carotte de forage ou une traverse le long d'une paroi rocheuse. L'identification de la trace des discontinuités est absolument nécessaire au calcul du RQD.

Les levés géophysiques héliportés (Tableau 4.2) ont permis de localiser des anomalies. Ceci permettra de faire des recommandations appropriées.

Les paramètres utiles à l'étude sont les suivants :

- |                                     |                     |
|-------------------------------------|---------------------|
| • Superficie                        | 300 km <sup>2</sup> |
| • Ligne de traverse                 | 1048 km             |
| • Ligne de rattaché                 | 144 km linéaires    |
| • Élévation de la propriété         | 350 a 1050 m        |
| • Direction des lignes de traverse  | N40°O               |
| • Espacement des lignes de traverse | 300 m               |
| • Hélicoptère                       | Aérodats            |
| • Vitesse du vol                    | 30 m/s (60 nœuds).  |

Tableau 4.2 : Levés géophysiques hélicoptères de systèmes métallogéniques des galeries Mémé-Casséus de la région Sedren. Anomalies majeures : une mine auro-cuprifère. (Modifié par Sodemine 2018)



L'exploration telle que photographiée à la Figure 4.4 identifie sommairement les anomalies majeures : une mine auro-cuprifère. Présence de minéraux (calcaire limoneuse, sable alluvionnaire, argile schisteuse, brèches et silicates etc.). Voilà de ce qui suit, le rapport N°: **C-2018** dressé de tableaux, ce que révèle l'analyse des échantillons de roches de la région de Terre Neuve. Voir Annexe D pour autres détails.

#### 4.4 Évaluation des indices classiques de caractérisation du massif rocheux

Les indices classiques évalués ont été évalués pour chacun des deux sites. Ces indices sont : la fréquence linéaire totale de l'ensemble des discontinuités, le compte volumétrique des discontinuités, le RQD, le ratio RQD/Jn du système GSI et la sommation des paramètres relatifs au RQD et celui relatif au plus petit espacement normal du système RMR. Voir Annexe D pour autres détails.

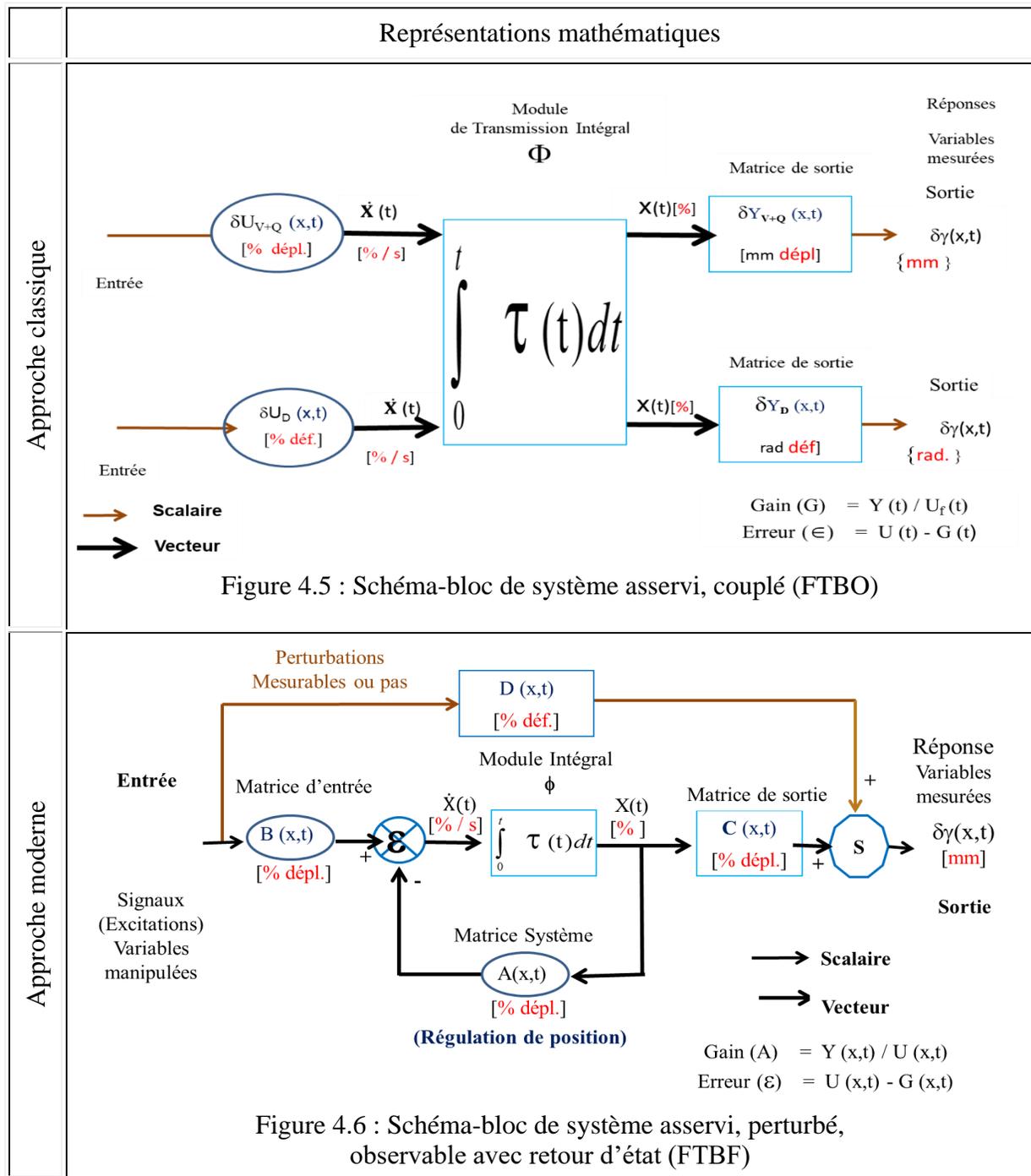
#### 4.5 Adaptation du schéma-bloc aux fonctions de transfert à l'étude de Sedren

Dans une approche systémique en vue de décrire le problème géotechnique dans le cadre des gisements à l'étude, un système physique simplifié équivalent remplacera le système couplé (Figure 4.2), et justifiera la réalité géotechnique.

Le Tableau 4.3 met en évidence le concept de deux représentations schématiques (modèle ouvert et fermé) afin de faciliter l'analyse comparative des variables; des spécificités; des similitudes; des différences et de faire le choix du modèle à développer.

À toutes fins pratiques, l'approche moderne sera employée; celle de la commande optimale de systèmes multivariables avec retour d'état. Dans le cadre de notre étude, nous privilégions la simplification du problème réel. Des opérations conventionnelles appliquées aux blocs permettront de simplifier le problème.

Tableau 4.3 : Concept de système asservi, multivariable couplé, FTBO<sup>42</sup> versus celui de système asservi, perturbé, observable avec retour d'état, FTBF<sup>43</sup>



<sup>42</sup> La FTBO est utilisée pour analyser le comportement du système en boucle ouverte.

<sup>43</sup> La FTBF est utilisée pour analyser les performances du système en boucle fermée.

#### 4.5.1 Représentation mathématique : Fonction de transfert du système en boucle ouverte (FTBO)

Le système en boucle ouverte (Figure 4.3) correspond au système ouvert sans boucle de rétroaction. Autrement dit, on ouvre ou on fait une coupure dans la chaîne de retour. Le point de calcul d'une FTBO se fait sur la chaîne de retour avant le sommateur.

$$\begin{aligned}
 X \text{ [ mm ]} &= X(t) && : \text{Vecteur d'état de position dimension } n \\
 \dot{X} \text{ [% / s]} &= \dot{X}(t) && : \text{Matrice d'état de mobilité de dimension } n \times n \\
 \dot{Y} \text{ [ m / s]} &= \dot{Y}(t, x) && : \text{Vecteur mobilité de sortie de dimension } m \\
 \ddot{Y} \text{ [ } \mu\text{m / s}^2\text{]} &= \ddot{Y}(t, x) && : \text{Vecteur accélération de sortie de dimension } m \\
 \delta U \text{ [%]} &= \delta U(t, x) = B(t, x) && : \text{Vecteur de déplacement d'entrée de dimension } n \times r \\
 \delta Y \text{ [mm ; rad.]} &= \delta Y(t, x) = C(t, x) && : \text{Matrice de déplacement de sortie de dimension } m \times r \\
 \delta p_{(v+Q)} \text{ [MPa]} &= \delta p(t, x) && : \text{Matrice de dimension } n \times r \\
 \delta \sigma_{(D)} \text{ [MPa]} &= \delta \sigma(t, x) && : \text{Matrice de dimension } n \times r \\
 A \text{ [mm/s]} &= Y / U = B(t, x) / C(t, x) && : \text{Matrice Gain de dimension } n \times n \\
 \phi \text{ [ mm / s]} &= H(t) = \int_0^t \tau(t) dt && : \text{Fonction de transfert / Flux (Champ d'effort)} \\
 \epsilon \text{ [%]} &= B(t, x) - A(t, x) = U(t) - A(t) && : \text{Erreur commise dans le système.}
 \end{aligned}$$

#### 4.5.2 Représentation mathématique : Fonction de transfert du système en boucle fermée (FTBF)

Convertissons le système réel <sup>44</sup> en un système équivalent performant (Figure 4.4).

Le point de calcul d'une FTBF se fait à la sortie du système.

$$U(t) = [1 + H(t) A(t)] \quad (4.1)$$

$$Y(t) = H(t) \epsilon(t) \quad (4.2)$$

$$\text{Où : } \phi = H(t) = \int_0^t \tau(t) dt \quad (\text{réceptance}) \quad (4.3)$$

$$\epsilon(t) = U(t) - A(t) \quad (4.4)$$

$$A(t) = Y(t) / U(t) \quad (4.5)$$

---

<sup>44</sup> Voir à l'Annexe H des détails sur la « Théorie de modélisation de systèmes multivariables réels ».

$$D'o\grave{u} \text{ le gain : FTBF} = G(t) = Y(t) / U(t) = \left[ \frac{H(t) \in(t)}{[1 + H(t) A(t)]} \right] \quad (5.6)$$

#### 4.6 Validation du syst\eme minier souterrain

La validit\e du syst\eme minier souterrain s'est d\eroul\ee avec l'objectif de s'assurer de la coh\erence et de la logique du mod\ele sous diff\erentes hypoth\eses d'\evolution des variables exog\enes ou de pilotage. Diff\erents sc\enarios ont \et\e r\ealis\es lors de la syst\ematization afin d'assurer la logique d'interpr\etation aux r\esultats. Voir Tableau 4.4 pour des d\etaails sur l'analyse dimensionnelle des variables d'int\er\et.

Tableau 4.4 : Analyse dimensionnelle des variables d'\etat de stabilit\e des galeries mini\eres (Adapt\ee de Akrif, 2017)

	COMMANDES		R\EPONSES	
DOMAINES D'INT\ER\ET G\en\eralit\es	TAUX = EFFETS $\tau(t) = \dot{Q} = \frac{dQ}{dt}$	QUANTIT\E = CUMUL D'EFFETS $Q(t) = Q_0 + \int \tau(t)dt$	EFFORTS = CAUSES (Perturbations) $p(t) = \dot{\phi}(t) = \frac{d\phi}{dt}$	FLUX = CUMUL DE CAUSES (Variables d'int\er\et) $\phi(t,s) = \phi_0 + \int_0^t p(t)dt$
Gravit\e G\eotechnique $\delta\gamma_m(t,x)$ [mm]	$v_m(t) = \dot{X} = \frac{dX}{dt}$ [mm/s]	$X_m(t) = X_0 + \int v(t)dt$ [mm]	$\sigma'_m(t) = \dot{\gamma}(t) = \frac{d\gamma}{dt}$ [MPa]	$\gamma_m(t, X_m) = \gamma_0 + \int_0^t \sigma_m(t)dt$ [Flux de D\eplacement]
Perturbations: Excavation et/ou Sismicit\e $\delta\gamma_{V+Q}(t,x)$ [mm]	$v_E(t) = \dot{X} = \frac{dX}{dt}$ [cm/s]	$X_E(t) = X_0 + \int v dt$ [mm]	$M_E(t) = \dot{\gamma}(t) = \frac{d\gamma}{dt}$ [N-mm]	$\gamma_E(t, X_E) = \gamma_0 + \int_0^t \sigma_E(t)dt$ [Flux de D\eformation]
Perturbations: \Electrochimie $\Delta H(t,s)$ [Cal. ou J ]	$i(t) = \dot{Q} = \frac{dQ}{dt}$ [A/s]	$T(t) = T_0 + \int i dt$ [°C]	$p(t) = \Delta \dot{H}(t) = \frac{dH}{dt}$ [Cal. ou J ]	$H(t,s) = H_0 + \int_0^t p(t)dt$ [Flux de D\egradation]
Note : Les Scripts Matlab ci-apr\es (Figures 6.3 \u00c0 6.5) relatives \u00c0 notre mod\ele sont des r\esultats-types de nos calculs effectu\es \u00c0 l'aide des \equarements s\electionn\ees. Voir la partie hachur\ee du Tableau 4.4 ci-contre.				

## 4.7 Conclusion

La caractérisation du massif rocheux repose sur la connaissance des caractéristiques des discontinuités présentes dans le massif rocheux. Ces caractéristiques sont obtenues selon deux avenues : des relevés de carottes (core logging) et de relevés par traverse (mapping).

### a) Relevés de carottes

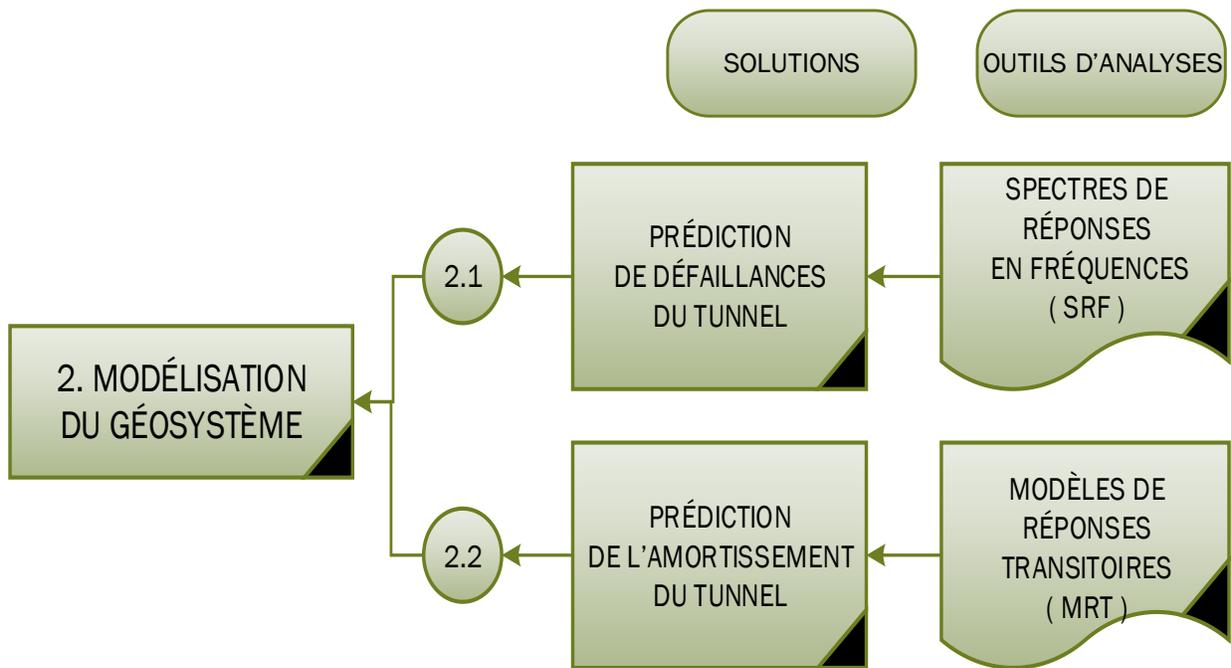
Après qu'un gisement de minerais soit découvert et que son importance justifie l'implantation d'une mine, des forages sont commandés pour connaître la structure géologique du massif rocheux. Les carottes ainsi forées deviennent la première source d'information pour la caractérisation du massif rocheux jusqu'au moment où l'accès aux galeries soit disponible en toute sécurité. Ces données sont d'un grand intérêt puisqu'elles influenceront la disposition structurale de la mine. De plus, la prospection souterraine permet de préciser l'emplacement du gisement ou d'identifier de nouveaux filons. Le relevé des carottes qui découle de cette prospection permet également de caractériser le massif rocheux à ces endroits. Les carottes de forage sont déposées dans des boîtes pour faciliter leur transport et leur entreposage. La manipulation des carottes de forage peut amener une détérioration de l'intégrité de la carotte. Ainsi, des cassures peuvent en résulter, modifiant la structure géologique apparente des carottes et, par conséquent, la caractérisation du massif rocheux qui en est déduite. Pendant l'entreposage, les éléments extérieurs comme l'eau peuvent également provoquer une détérioration structurelle des carottes de forage. De plus, l'accessibilité aux boîtes de carottes de forage entreposées à l'extérieur n'est pas commode lorsqu'il y a présence de beaucoup d'humidité au sol. La photographie des boîtes de carottes de forage apparaît comme une solution économique à ces inconvénients. Lorsque prise pendant le forage, la photographie minimise la présence de cassures provoquées par la manipulation des carottes. Par ailleurs, la photographie des carottes de forage rend possible la création d'une base de données photographiques. Cette dernière offre une accessibilité accrue et une intégrité temporelle et physique de la structure géologique des carottes de forage.

## TROISIÈME PARTIE

### MODÉLISATION RHÉOLOGIQUE & ANALYSE MODALE <sup>45</sup> DU SYSTÈME

Cette troisième partie de la thèse est axée sur les aspects de modélisations d'un système géomécanique équivalent. On passe en revue l'ensemble des outils mathématiques (l'observation sur le terrain; l'analyse mathématique exacte; l'analyse numérique, les éléments finis). Les approches analogique et numérique sont pris en compte pour la modélisation du système géotechnique de Sedren déjà défini au chapitre précédent.

La Figure 5.1 (adaptée de Ostertag, 2006 et de Akhrif, 2017) synthétise la méthodologie efficace de modélisation du système géomécanique de Sedren.



Script Visio, 2022

Figure 5.1 : Méthodologie de modélisation du système géomécanique de Sedren  
(Adaptation de Ostertag, 2006 et Akhrif, 2017)

---

<sup>45</sup>Analyse modale : calculs de fréquences naturelles et des vecteurs propres à l'aide des modes (amortissement, rigidité, frottement, masse) comme propriétés de l'infrastructure (galeries du tunnel de la mine Sedren).

Dans cette troisième partie de l'étude, deux autres chapitres s'ajoutent à la thèse. Le Chapitre 5 développe un modèle hybride, contributif, conforme au système réel à partir de la sélection d'une ou des variante(s) retenue(s). Le Chapitre 6 expose les méthodologies analytiques susceptibles de mieux composer avec la complexité des phénomènes géophysiques des galeries à l'étude. Notamment, on fait référence aux différentes options considérées pour l'analyse : méthode énergétique de Euler-Lagrange, méthode harmonique de Fourier et méthode rhéologique de Newton. Une étude de faisabilité est ainsi proposée en vue d'opter pour la solution appropriée. À la toute fin, une méthode systématique est préconisée dans le but de résoudre le problème d'asservissement et de régulation de systèmes multivariables

## **CHAPITRE 5**

### **DÉVELOPPEMENT D'UN MODÈLE GÉOMÉCANIQUE**

L'un des objectifs spécifiques de la thèse est d'établir un modèle mathématique vu sous l'angle géomécanique qui prend en compte les effets du temps sur le comportement rhéologique d'une excavation souterraine dans un massif rocheux. Ce modèle numérique est calé sur des excavations de galeries Mémé et Casséus de la mine Sedren, et il requiert une bonne connaissance des contraintes *in situ*.

Dans ce chapitre, deux phénomènes doivent être pris en compte pour la modélisation de déformations différées sur le confinement des excavations souterraines (Manh, 2014) : « *a) une loi de comportement viscoélastique et/ou viscoplastique; b) la rupture différée du massif rocheux* ». En outre, plusieurs représentations mathématiques existent : a) La méthode énergétique de Lagrange (équations différentielles ordinaires). b) La méthode d'analyse harmonique de Fourier (principe de superposition de Boltzmann / analyse de fréquences individuelles). c) La méthode des transformées de Laplace (fonction de transfert / analyse de fréquences abstraites). d) La méthode de variables d'état (équations différentielles vectorielles de 1<sup>e</sup> ordre). Toutes ces approches donnent des résultats équivalents, mais certaines sont mieux adaptées que d'autres pour un problème donné (Bousquet, 2017). Tenant compte de ces généralités, nous développons un modèle géotechnique adéquat.

#### 5.1 Sélection de méthodes pertinentes

Dans un premier temps, nous allons brièvement passer en revue plusieurs variantes du problème. Et dans un deuxième temps, nous privilégions l'option prioritaire.

### 5.1.1 Méthode des éléments finis (FEM) de Euler-Lagrange

La méthode de Lagrange est basée sur le principe du travail virtuel et de la conservation de l'énergie. Cette approche consiste à trouver le champ de déplacement  $u(x)$  qui satisfait les équations suivantes en tout point  $x$ . Voir Figure 5.2 pour des détails sur la méthode.

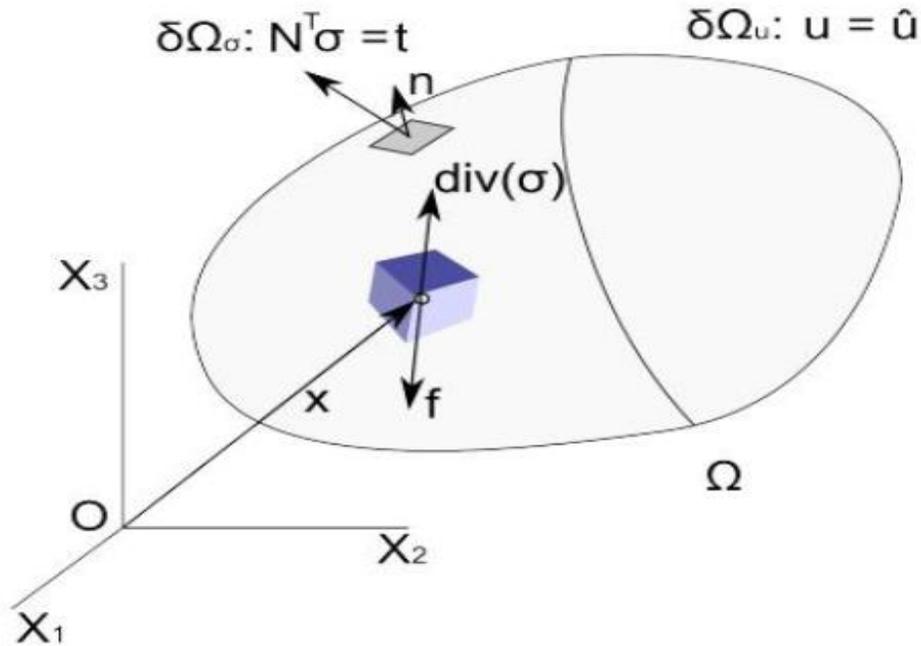


Figure 5.2 : Définition du problème selon la méthode énergétique de Lagrange

Soit  $n = \text{Gradient tenseur Contrainte (Cauchy)} = \nabla \sigma_i = e_i (d\sigma / dx_i)$

Soit  $f = \text{Divergence tenseur Contrainte} = \text{Div } \sigma = \nabla \cdot \sigma$

$$\text{Div}(\sigma(x)) + f(x) = 0 \quad (6.1)$$

$$\sigma(x) = C(x) \varepsilon(x) \quad \text{où } \varepsilon(x) = \nabla u(x) \quad (6.2)$$

Avec les conditions aux frontières :

$u(x) = \hat{u}(x)$ , pour tout  $x \in \delta\Omega_u$  : déplacements imposés

$t(x) = \sigma(x) n(x)$ , pour tout  $x \in \delta\Omega_\sigma$  : forces externes

Où :  $\sigma(x) = \rho g h$  : contraintes externes dues à l'action du temps ou des lois gravitationnelles

$\sigma(x) = C(x) \varepsilon(x)$  : contraintes internes dues à l'action du temps ou loi de comportement).

$C(x) = C(x,t)$  : forces internes de l'action spatio-temporelle  
influçant le comportement des matériaux.

$t(x) = \sigma(x) n(x)$  : contraintes externes dues à l'action de l'environnement.

$f(x) = f$  : contraintes externes dues à l'action anthropique

Si on multiplie l'équation différentielle par une fonction test quelconque  $\delta U$

et que l'on intègre sur le domaine, nous observons :

$$\Delta Y(x) = [K_\omega] [\Delta U] - [\Delta F] = [K_\omega] [\Delta U] - \Delta \omega [(\sigma_1 - \sigma_3)] \quad (6.3)$$

$$\Delta U(x) = [K_\omega]^{-1} [\Delta U - \Delta F] \quad (6.4)$$

Donc :

$$U(x) = [K_\omega]^{-1} [R] \quad (6.5)$$

Où  $\delta U [\%] = \delta U (t,x)$  : Vecteur de déplacement d'entrée de dimension  $n \times r$

$\Delta U$  : Variation de déformation

$\Delta F$  : Variation de perturbations (charges externes / excitations))

$[K_\omega]$  : matrice de rigidité du système endommagé ( $\omega$ )

$\omega$  : paramètre endommagement.

$$\iiint_V (\nabla \cdot \sigma) dV = \iint_S (n \cdot \sigma) dS \quad (\text{Théo. Gauss}) \quad (6.6)$$

$$K = \int_\Omega \nabla H^T C \nabla H dV$$

$$[C_\omega] = \begin{vmatrix} \left(1 - \omega + \frac{\omega}{3}\right) & \frac{\omega}{3} & \frac{\omega}{3} & 0 & 0 & 0 \\ & \left(1 - \omega + \frac{\omega}{3}\right) & \frac{\omega}{3} & 0 & 0 & 0 \\ & & \left(1 - \omega + \frac{\omega}{3}\right) & 0 & 0 & 0 \\ & \text{symmetry} & & (1 - \omega) & 0 & 0 \\ & & & & (1 - \omega) & \\ & & & & & (1 - \omega) \end{vmatrix} \quad (6.7)$$

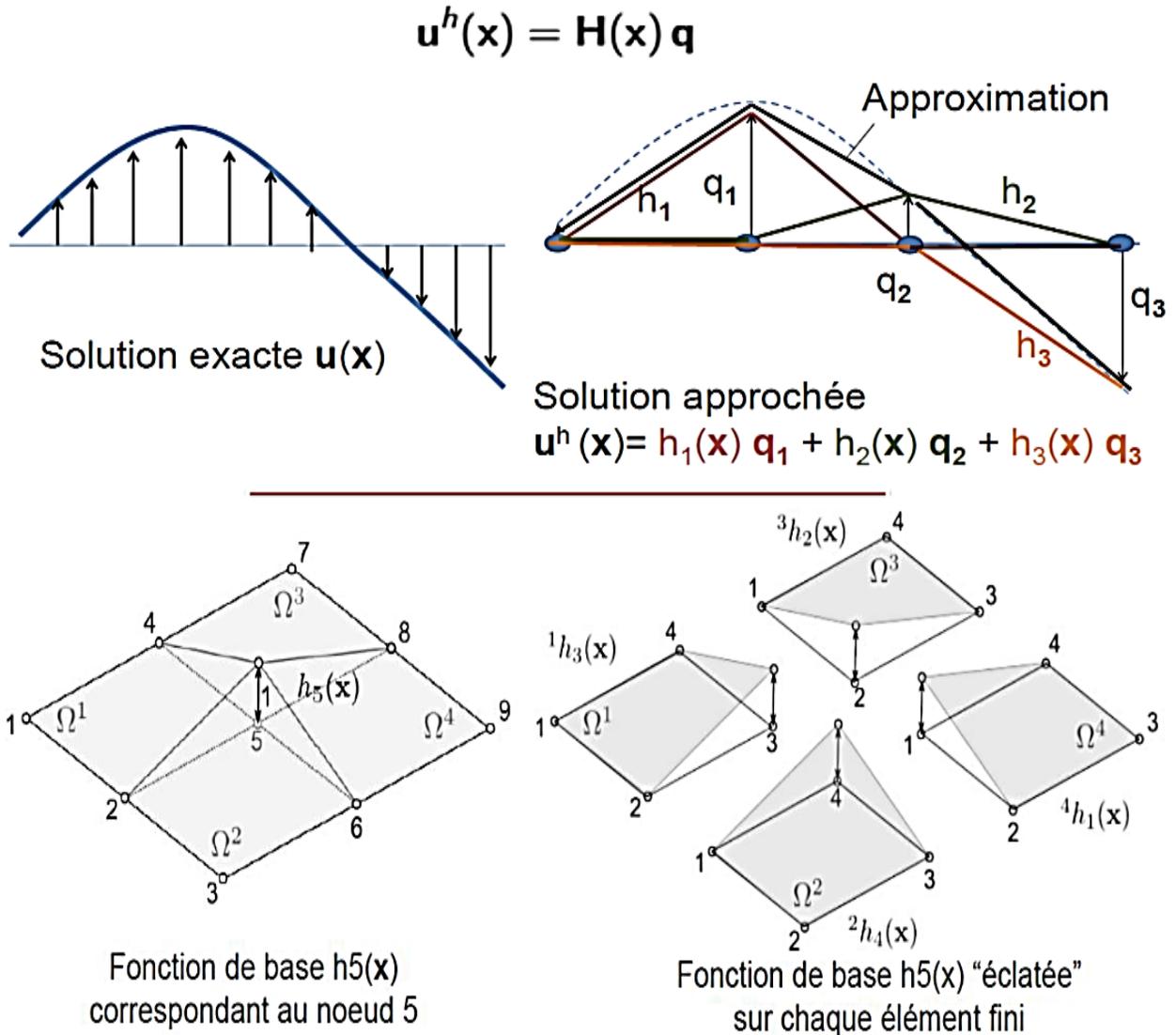


Figure 5.3 : Éléments finis de quadrilatères à nœuds  
et conditions aux limites du modèle

L'approximation du champ de déplacement  $\{\mathbf{U}(\mathbf{x})\}$  inconnu s'obtient sous la forme de combinaisons linéaires de fonctions de base  $\mathbf{H}(\mathbf{x})$  connues correspondant au nœud d'un élément fini dans un maillage. Les éléments finis et conditions aux limites utilisés du modèle du tunnel dans le massif sont illustrés à la Figure 5.3.

La solution  $\mathbf{U}$  minimise l'énergie interne du système. Conclusion : Bonne méthode. *Mais la méthodologie de résolution du problème est fastidieuse et difficile d'approche.*

### 5.1.2 Méthode d'analyse harmonique de Fourier

“L'analyse harmonique de Fourier est basée sur le principe de superposition de fréquences individuelles de Boltzmann. Cette théorie, largement utilisée aujourd'hui, a connu des prolongements, comme les ondelettes” (Bousquet, 2017).

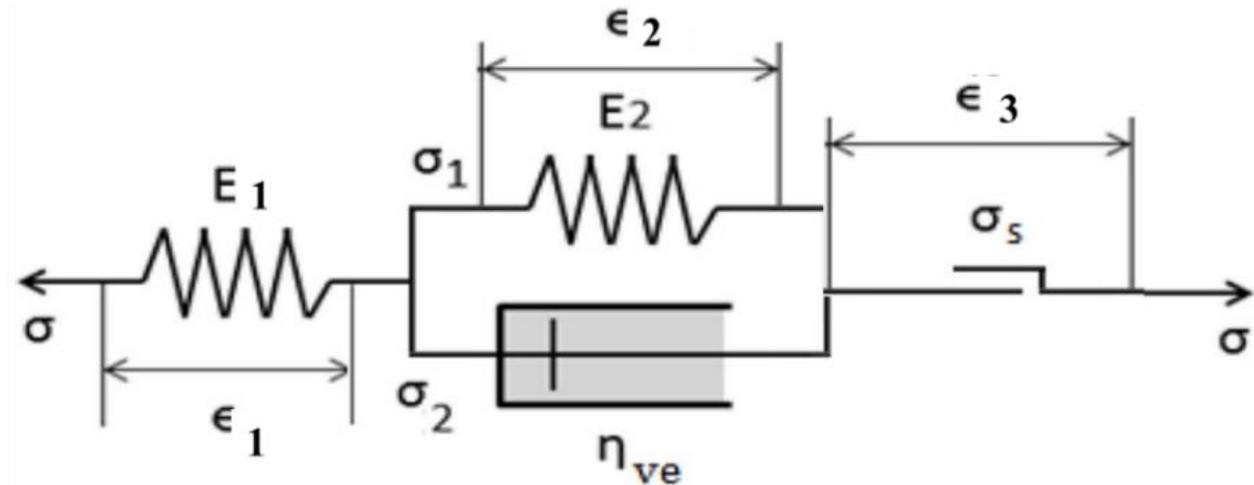
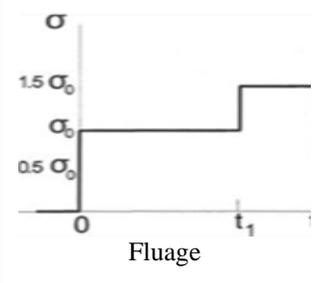
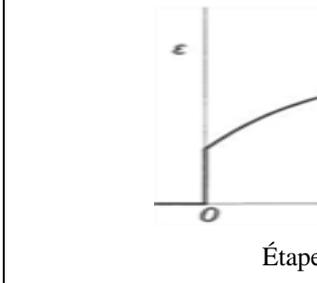
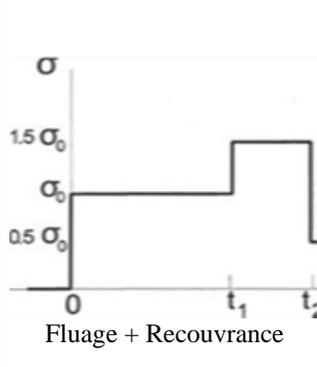
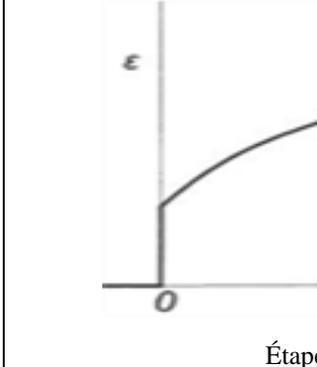
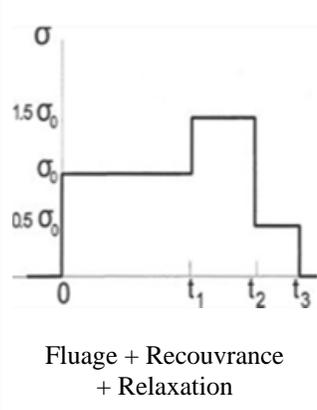
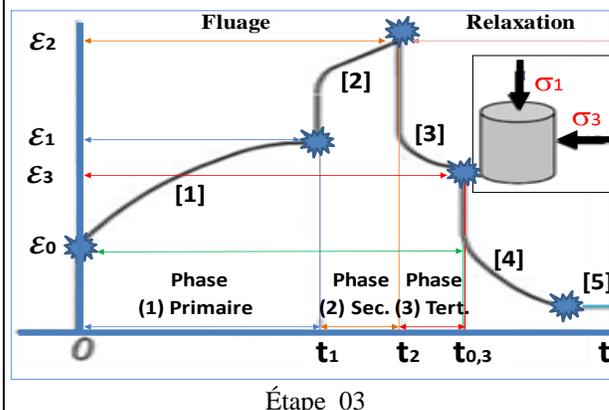


Figure 5.4 : Schéma du modèle linéaire proposé à 4 corps - Modèle géomécanique spatio-temporel développé - Caractéristiques rhéologiques : (1) Zone élastique (partie structurale la plus lointaine de la clé en forme D). (2) Zone viscoélastique. (3) Zone plastique (La clé et sa partie structurale environnante immédiate)

Expliquons le solide à quatre (4) corps, également appelé « *modèle linéaire standard* », composé du solide de Kelvin, couplé à un ressort (solide de Hooke) et un patin (solide de Hoek-Brown) en série tel que schématisé à la Figure 5.4. Ce modèle rhéologique simple est utile pour représenter le comportement d'un solide viscoélastique, car il répond à tous les tests élémentaires qu'on lui fait subir. En fin de compte, nous allons établir la relation contrainte - déformation pour ce modèle et étudier son comportement dans les différents tests élémentaires.

D'après le principe de Boltzman, la déformation différée d'un géomatériau lors d'un essai de fluage par palier semble présenter une vitesse quasi infinie à chaque début de palier. L'analyse graphique et analytique de la déformation (par l'ajustement d'une loi telle que dressée au Tableau 5.1, qui conduira à des résultats acceptables, est de la forme de :

Tableau 5.1 : Concept d'essais de fluage de matériau solide <sup>46</sup>

STAGES	SIGNAUX (Essai de traction)	RÉPONSES PRINCIPE BOLTZMANN (solllicitations discontinues)
Modèle Avec FLUAGE		
Modèle Avec FLUAGE & RECOUVRANCE		
Modèle Avec FLUAGE, RECOUVRANCE & RELAXATION		

<sup>46</sup> Concept d'essais de fluage d'un matériau solide

- [1] => Déformation instantanée
- [2] => Déformation retardée
- [3] => Recouvrance partielle instantanée
- [4] => Recouvrance retardée
- [5] => Non-Recouvrance

- une loi rhéologique, inspirée de Boltzmann, qui aura : 5 paramètres + 1 variable :  $\alpha, \sigma_j, A_j, B_j, \sigma(t)$  ;
- de modèle  $\dot{\epsilon}_i(t) = f(\sigma).g(\epsilon_i).h(t)$  ayant une approche non linéaire par rapport à la vitesse du déviateur ;

$$f\left(\frac{d\sigma}{dx}\right) = \sum_{j=1}^n f(\Delta\sigma_j) \delta(t - t_j) \quad (5.8)$$

- développé de la façon suivante selon Fourier :

$$d\epsilon = d\sigma - J(t-u)$$

$$\epsilon(t) = \int_0^t J(t-u) \frac{d\sigma}{du} \cdot du = J(t) \sigma(0) + \int_0^t (t-u) \frac{d\sigma}{du} \cdot du \quad (5.9)$$

$$\epsilon_i(t) = \sum f(\Delta\sigma_j) (t - \tau)^\alpha \quad (5.10)$$

$$\epsilon_i(t) = \sum A_j (t - \tau)^\alpha \quad (5.11)$$

$$A_j = B_{j-1} \quad \text{et} \quad B_0 = 0$$

$$\epsilon_i(t) = \int_0^t f\left(\frac{d\sigma(\tau)}{d\tau}\right) (t - \tau)^\alpha d\tau \quad (5.12)$$

D'où la formulation mathématique suivante selon le principe Boltzmann ou de superposition (Figure 5.5).

$$d\sigma = \frac{\delta\sigma}{\delta u} - J(t-u) \quad (5.13)$$

$$\sigma(t) = \int_0^t E(t-u) \frac{\delta\sigma}{\delta u} \cdot du = E(t) \sigma(0) + \int_0^t (t-u) \frac{d\epsilon}{du} \cdot du \quad (5.14)$$

$$\sigma(t) = \sum_{j=1}^n \Delta\sigma_j H(t - t_j) \quad \text{avec } H : \text{fonction Heaviside}^{47} \quad (5.15)$$

$$\text{Où :} \quad \Delta\sigma_j = \sigma_j - \sigma_{j-1} \quad (5.16)$$

$$\sigma_0 = 0 ; \quad \sigma(t) = \sigma_j \quad \text{pour } t \in [t_{j-1}, t_j[ \quad (5.17)$$

---

<sup>47</sup> En mathématiques, la fonction de Heaviside (également fonction échelon unité, fonction marche d'escalier), du nom de Heaviside est la fonction indicatrice de  $\mathbb{R}^+$ . C'est donc la fonction H (discontinue en 0) prenant la valeur 1 pour tous les réels strictement positifs et la valeur 0 pour les réels strictement négatifs.

### 5.1.3 Méthode d'analyse rhéologique de Newton

Cette méthodologie vise à se doter d'un outil de simulations, d'aide à la sélection, à l'amélioration ou à la conception de solutions de prévention des risques mécaniques pour en faire l'appréciation en tenant compte du facteur humain. Soit en simulant la distribution de pressions existantes (toit ou murs) exercées sur le massif rocheux.

La méthode rhéologique de Newton est basée sur la loi gravitationnelle (Figure 5.5).

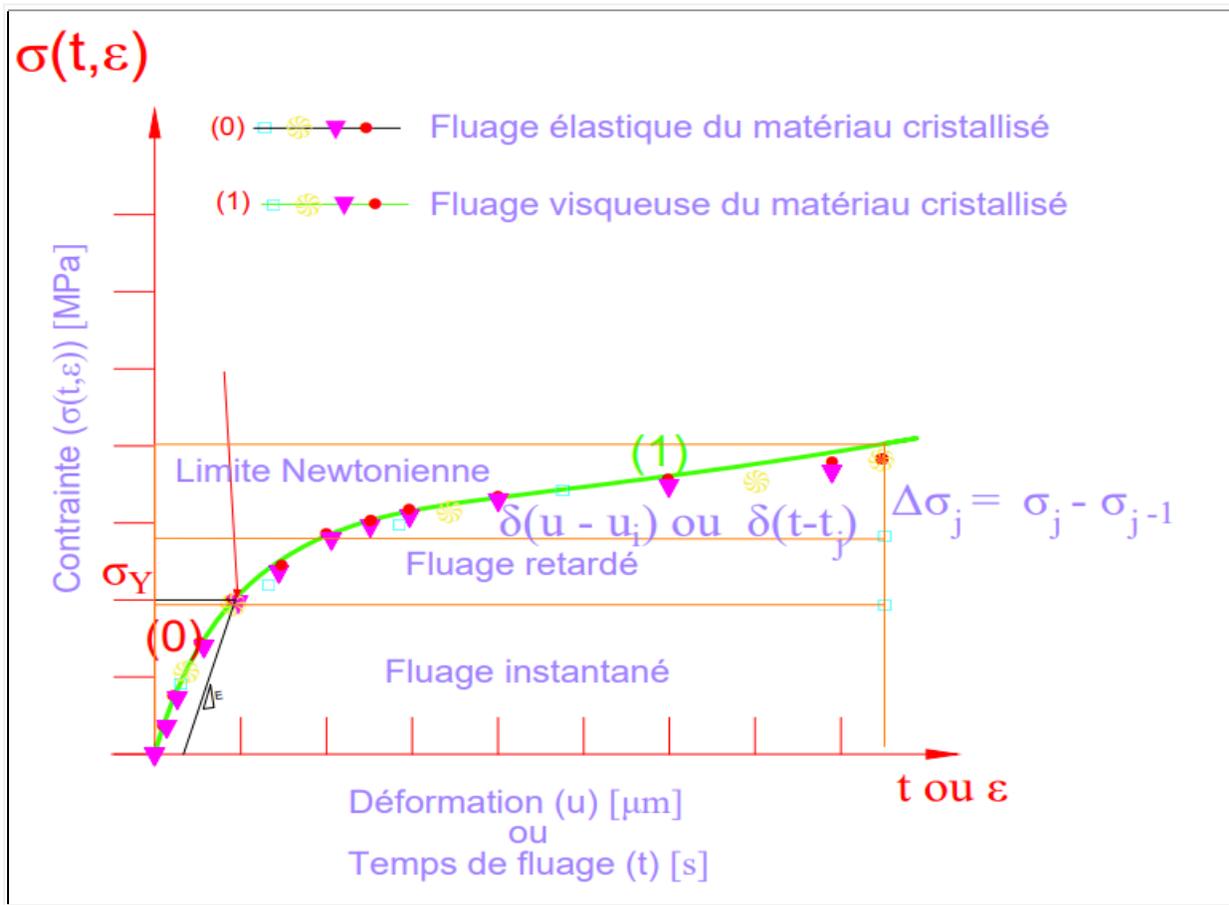


Figure 5.5 : Concept de sollicitations continues du principe de Boltzmann

Pour modéliser un système mécanique (Voir Figure 5.6), il faut de prime abord l'identifier en :

- dessinant le diagramme des mouvements et forces qui agissent sur le système;
- déterminant des lois physiques régissant le système d'équations différentielles.

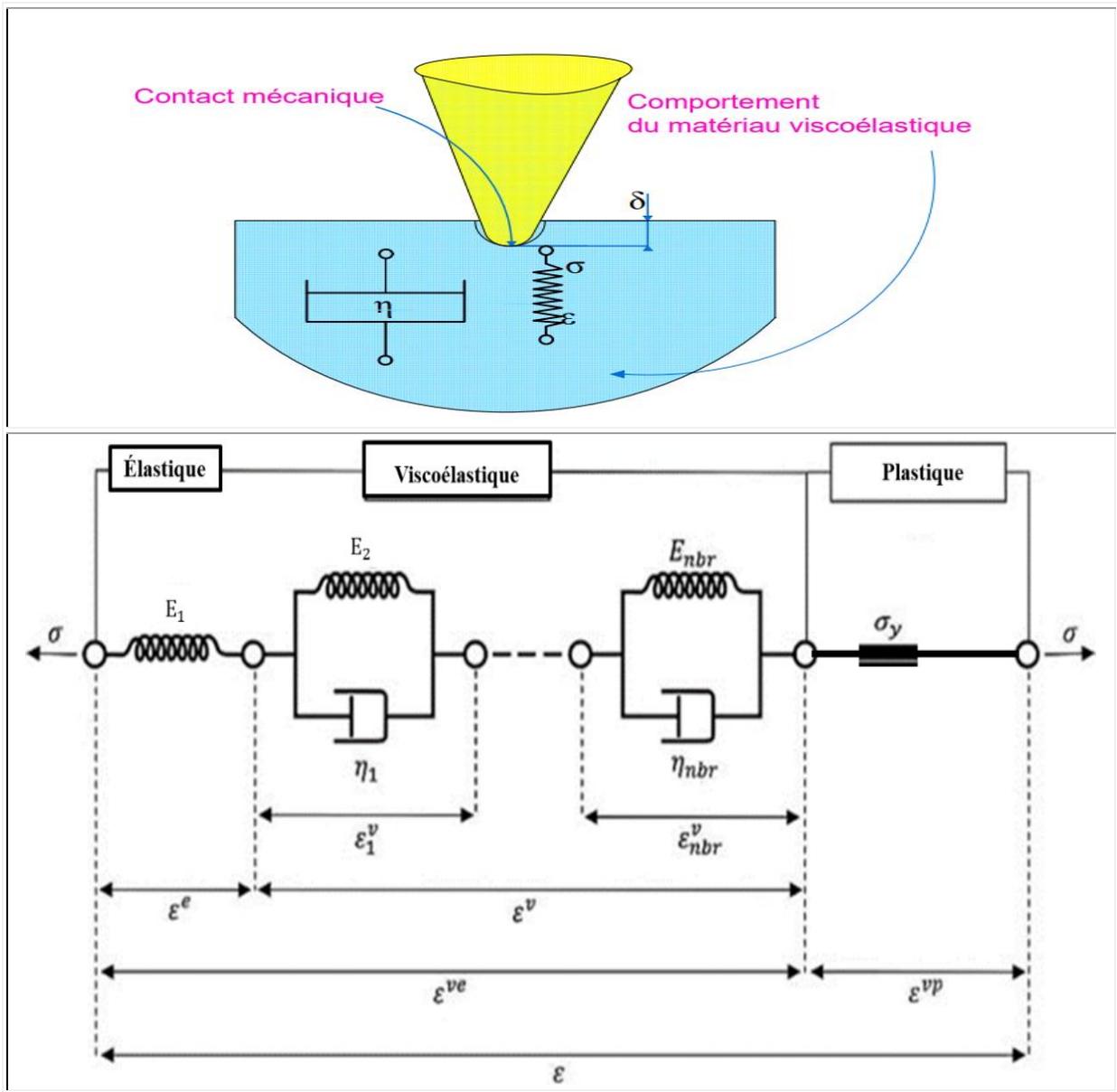


Figure 5.6 : Généralisation du modèle rhéologique ciblé.

$$U(t) = \varepsilon(t) = [\sigma_0 + (\lambda_e \varepsilon_v + \mu \varepsilon_e) + c_3] + \left\{ \left( \frac{\sigma_0}{E_1} \right) \left[ \left( \frac{\sigma_1}{G_2} \right) + \frac{\sigma_1}{\eta_2} \right] \right\} \quad (5.36)$$

$$U(t) = \varepsilon(t) = \sigma_s + \left\{ \left( \frac{\sigma_1}{E_1} \right) \left[ \left( \frac{\sigma_2}{G_2} \right) + \frac{\dot{\sigma}_2}{\eta_1} \right] \right\} \quad (5.37)$$

$$\text{Où : } \sigma_s = \sigma_{\text{Kelvin-Voigt}} + \sigma_{\text{St-Venant}} = [\sigma_0 + (\lambda_e \varepsilon_v + \mu \varepsilon_e) + \sigma_s] \quad (5.38)$$

- Pour le modèle intact :

$$\sigma + \left(\frac{\eta_1}{E_1 + G_2}\right) \dot{\sigma} = \left[\left(\frac{E_0 G_1}{E_1 + G_2}\right) \varepsilon + \left(\frac{E_0 G_1}{E_1 + G_2}\right) \dot{\varepsilon}\right] \quad \text{pour } \sigma \leq \sigma_s \quad (5.39)$$

$$\sigma - \sigma_s + \left(\frac{1}{E_1} + \frac{\eta_2}{G_2}\right) \dot{\sigma} + \left(\frac{\eta_2}{E_0 G_1 G_2}\right) \ddot{\sigma} = \eta_2 \dot{\varepsilon} + \left(\frac{\eta_2}{G_1}\right) \ddot{\varepsilon} \quad \text{pour } \sigma > \sigma_s \quad (5.40)$$

- Dans le cas d'un fluage, les équations deviennent :

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{G_2} \left(1 - e^{-\left(\frac{G_2}{\eta_2}\right)t}\right) \quad \text{pour } \sigma \leq \sigma_s \quad (5.41)$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{G_2} \left(1 - e^{-\left(\frac{G_2}{\eta_2}\right)t}\right) + (\sigma - \sigma_s) t \quad \text{pour } \sigma > \sigma_s \quad (5.42)$$

- Dans le cas d'un fluage avec endommagement, les équations deviennent :

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{G_2} \left(1 - e^{-\left(\frac{G_2}{\eta_2}\right)t}\right) \quad \text{pour } \sigma \leq \sigma_s \quad (5.40)$$

$$\varepsilon = \frac{\sigma^*}{E_1} + \frac{\sigma^*}{G_2} \left(1 - e^{-\left(\frac{G_2}{\eta_2}\right)t}\right) + (\sigma - \sigma_s) t \quad \text{pour } \sigma > \sigma_s \quad (5.41)$$

Dans ce genre de système, la déformation totale est égale à la somme des déformations des diverses composantes en série et la contrainte imposée au système est la somme des contraintes imposées à chaque composante en parallèle.

## 5.2 Développement de l'option pertinente

Afin d'analyser nos solutions, un tableau dressé nous guide dans la prise de notre décision finale. Voir Tableau 5.2 pour des détails sur la faisabilité.

Tableau 5.2 : Étude de faisabilité d'un problème de modèle géomathématique

	Faisabilité				Décision
	Développement Théorique (Maths)	Méthodologie expérimentale (Physique)	Tient compte du temps (t)	Tient compte de l'espace(x)	
<b>OPTION 1 :</b> Méthode énergétique De Euler-Lagrange	Résolution : <i>difficile.</i>	Résolution : <i>fastidieux.</i>	Oui	Oui	<b>REJETÉE</b> <sup>48</sup>
<b>OPTION 2 :</b> Méthode d'analyse harmonique de Fourier	Résolution : <i>complexe.</i>	Résolution : <i>facile.</i>	Oui	Non	<b>REJETÉE</b> <sup>49</sup>
<b>OPTION 3 :</b> Méthode rhéologique de Newton	Résolution : <i>facile.</i>	Résolution : <i>facile.</i>	Oui	Oui	<b>RETENUE</b> <sup>50</sup>

L'opportunité de contribuer à la résolution de problèmes de stabilité de cavités souterraines nous a guidés à envisager trois variantes : la méthode énergétique de Euler-Lagrange, la méthode d'analyse harmonique de Fourier et la méthode rhéologique de Newton.

De ces trois méthodes, d'évidents constats font de sorte que les options 1 et 3 se révèlent faisables ou prioritaires. Néanmoins, elles sont retenues étant donné qu'elles répondent bien aux critères et barèmes utilisés dans la prise de décision.

Toutefois, nous avons procédé à une analyse multicritère à des fins de valider la prise de décision ou pour voir si l'option 1 et 3 traduisent la réalité.

<sup>48</sup> Option 1 : non prioritaire puisque la méthodologie est fastidieuse et l'approche est difficile mais le respect du cadre spatio-temporel est pris en compte. L'endommagement est pris en compte.

<sup>49</sup> Option 2 : non prioritaire puisque la méthodologie est facile et l'approche est complexe mais le respect du cadre spatial n'est pris en compte.

<sup>50</sup> Option 3 : prioritaire puisque la méthodologie et l'approche sont faciles et le contexte spatio-temporel est pris en compte. La Transformée de Laplace peut être utilisée. Elle permet de transformer un produit de convolution dans l'espace temporel en un produit simple dans l'espace de Laplace.

Tableau 5.3 : Comparaison par paires des critères de décision <sup>51</sup>

	Critères	Durabilité	Économie	Sécurité	Résistance	Nb.	Nb. modifié	Poids	
							Arith.		
A	Durabilité	-	-	-	-	0	0+1	1/10	10%
B	Économie	B	-	-	-	2	2+1	3/10	<b>30%</b>
C	Sécurité	C	C	-	-	3	3+1	4/10	<b>40%</b>
D	Résistance	A	B	C	-	1	1+1	2/10	20%
TOTAL								10/10	100%

Les critères d'évaluation permettent de quantifier le rendement du système en considérant l'importance relative des objectifs. Les Tableaux 5.3 et 5.4 dressent les détails de l'analyse multicritère.

Tableau 5.4 : Matrice multicritère de décision

Critères (K <sub>i</sub> )	Pondération	OPTION 1		OPTION 2		OPTION 3	
		Résultat	Note	Résultat	Note	Résultat	Note
Durabilité	10%	75	10.0	75	10.0	50	5.0
Économie	30%	50	15.0	75	22.5	100	30.0
Sécurité	40%	50	20.0	75	30.0	100	40.0
Résistance	20%	75	10.0	75	10.0	100	15.0
TOTAL	100%		55.0%		72.5%		85.0%

<sup>51</sup> Critères :

- Durabilité (D) : Les proprios n'ont pas demandé à exploiter la mine. C'est une décision des instances publiques. Jusqu'où on peut aller jusqu'à faire endurer les travaux voire exproprier.
- Économie (B) : La construction de l'infrastructure ne doit être réalisée que si la mine est rentable.
- Sécurité (C) : L'infrastructure doit être sécuritaire.
- Résistance (A) : L'infrastructure doit résister à sa durée de vie utile (50 ans environ).

Vérifions si les jugements sont cohérents :

Construisons une matrice d'aléas de risques (Tableau 5.5) en se servant du barème du Tableau 5.6 qui nous guide dans notre analyse hiérarchique à des fins décisionnelles.

Tableau 5.5 : Matrice d'aléas de risques

No.	Description Risques	1	2	3	4	5	6	7	8	Ordre
		Expro.	B.P.	P.C.	A.V.	Pé.R.	Po.R.	P.	H.S.	
1	Expropriation (Expro)	1	1/5	¼	1/3	1/8	1/7	1/7	½	8 <sup>e</sup>
2	Baisse Productivité (B.P.)	5	1	3	7	1/5	1/5	1/3	1/3	4 <sup>e</sup>
3	Prob. Communicat. (P.C.)	4	1/3	1	1/3	1/6	1/6	1/5	3	6 <sup>e</sup>
4	Acte Vandalisme (A.V.)	3	1/7	3	1	1/7	1/7	1/6	1/3	7 <sup>e</sup>
5	Pérennité Ressource (Pé.R.)	9	5	6	7	1	3	4	6	1 <sup>e</sup>
6	Pollution Ressource (Po.R.)	7	5	6	7	1/3	1	3	6	2 <sup>e</sup>
7	Pauvreté (P.)	7	3	5	6	1/4	1/3	1	5	3 <sup>e</sup>
8	Hygiène sanitaire (S.P.)	2	3	1/3	3	1/6	1/6	1/5	1	5 <sup>e</sup>

Indice de cohérence :

$$I_c = (\lambda_{\max} - K) / (K-1) = (8 - 5) / 4 = 0.75 \leq 4 \quad (\text{Cf. Nb de Critères / Tab. 5.4})$$

Où :  $\lambda_{\max}$  (Degré d'importance max.) = 8 (Cf. Degrés d'importance des activités / Tab. 5.6)

IA (indice aléatoire) = 9 pour K = 5 (Cf. No. Aléa / Tab. 5.5)

Tableau 5.6 : Degrés d'importance des activités  
(D'après la théorie de l'analyse hiérarchique de projets)

Degrés d'importance	Définition	Deux éléments contribuent autant à l'explication
1	Importance égale des 2 éléments.	Deux éléments contribuent autant à la propriété.
3	Faible importance d'un élément par rapport à un autre.	L'expérience et l'appréciation personnelles favorisant légèrement un élément par rapport à un autre.
5	Importance forte ou déterminante d'un élément par rapport à un autre.	L'expérience et l'appréciation personnelles favorisant fortement un élément par rapport à un autre.
7	Importance prouvée d'un élément par rapport à un autre.	Un élément est fortement favorisé et sa dominance est attestée dans la pratique.
2, 4, 6, 8	Valeurs intermédiaires entre 2 appréciations voisines.	Un compromis est nécessaire entre 2 appréciations.
Réciproques (1/x)	Si l'activité i se voit attribuer l'un des chiffres précédents lorsqu'elle est comparée à i, j a donc la valeur réciproque lorsqu'on la compare à i.	---

$$R_C \text{ (ratio de cohérence)} = I_C / I_A = 0.75 / 9 = 0.0833$$

Alors : Les jugements sont cohérents puisque  $R_C \text{ (Ratio de cohérence)} = 0.083 < 10 \% .$

### 5.3 Développement d'un modèle hybride contributif

Dans ce protocole, un modèle viscoplastique basé sur le *principe de superposition de Boltzmann* modifié obéissant aux critères de rupture de Mohr-Coulomb modifié et/ou de Hoek-Brown sera notre choix. L'ensemble des réflexions précédentes a conduit à mettre en place cette méthodologie de dimensionnement de galerie particulièrement dans un massif rocheux présentant des déformations différées.

Nous allons donc développer un modèle de comportement des massifs rocheux tenant compte des effets visqueux basés sur le modèle CVISC simplifié du code FLAC<sub>2D</sub>. Ce modèle représenté sous la forme générale selon la Figure 5.5 et sous la forme analogique à 4 corps selon la Figure 6.6 est de type viscoplastique. Il découle de celui de Kelvin-Voigt et comprend, en plus de ce dernier, un patin plastique de type Mohr-Coulomb. La loi d'écoulement associée permet de calculer les déformations plastiques irréversibles qui se développent instantanément puis au cours du temps. Ce modèle a été intégré dans les codes FLAC<sub>2D</sub> et Plaxis<sub>2D</sub>.

#### 5.4 Étude de déformation du modèle d'étude développé

Si on examine systématiquement le modèle d'une cavité atteignant la phase viscoplastique, on peut le représenter par un solide à quatre (4) corps ayant une histoire de sollicitations et de perturbations telles qu'illustrées à la Figure 5.7 mais en y ajoutant une boucle de rétroaction pour la fermeture afin d'augmenter la performance du modèle.

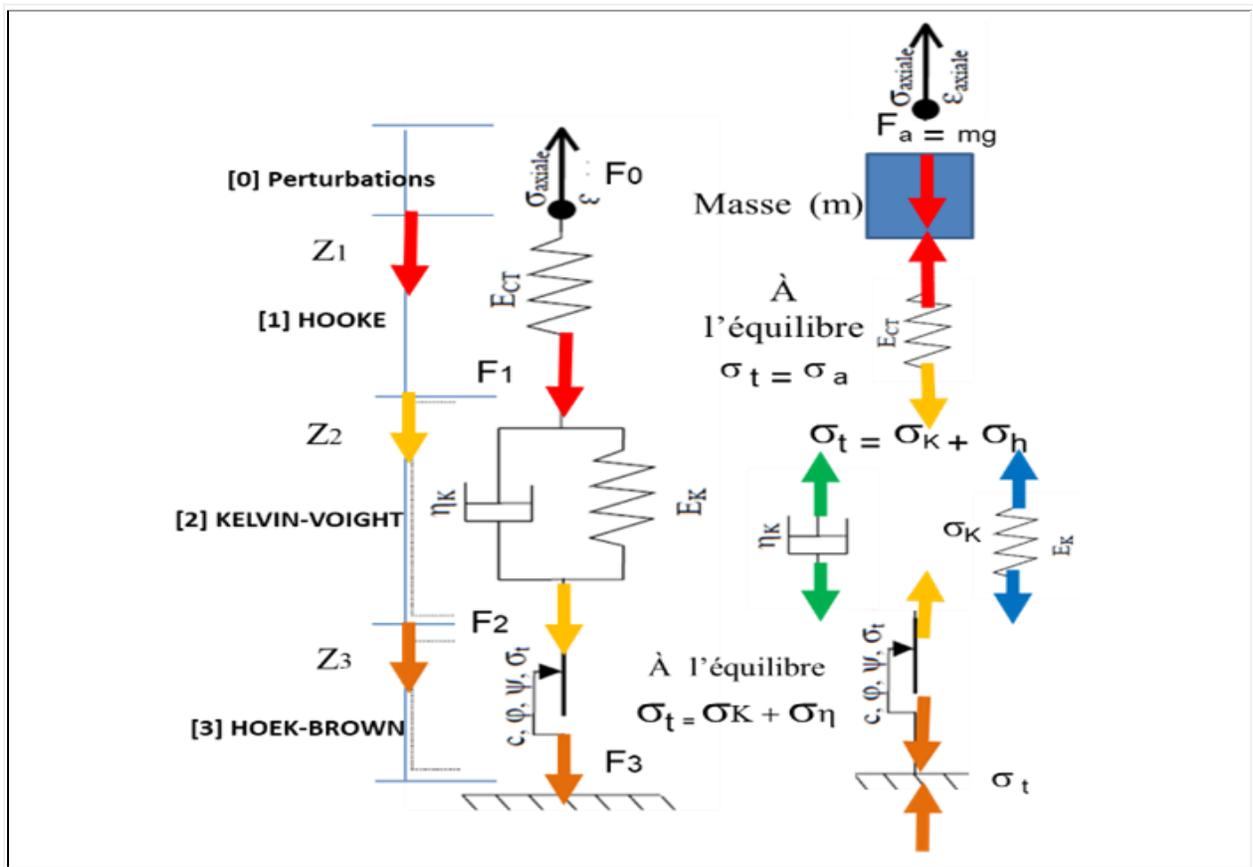


Figure 5.7 : Diagramme de corps libre (DCL) du modèle ciblé

D'après le Diagramme de corps libre (Figure 5.6) spécifique de masse m, la force engendrée sur la masse selon notre modèle isolé développé s'obtient ainsi par principe de superposition modale :

$$\text{Force transmise (excitation)} = -\mu (Y-U) - K_o [K (Y-U) + \eta (\dot{Y} - \dot{U})] = m \ddot{U}(t) \quad (5.19)$$

Par arrangement, l'équation du mouvement harmonique s'écrit ainsi :

$$m \ddot{U}(t) + c \dot{U} + K U = f(t) = c \dot{Y} + K Y \quad \text{où } Y = m\omega^2 \sin(\omega t + \phi) \quad (5.20)$$

$$\text{Alors : } Y = c \dot{Y} + K Y = m\omega^2 \sin(\omega t + \phi) \quad (5.21)$$

$$K = \mu + K_k = \mu + K_o [K] \quad (5.22)$$

$$c = \mu + Kc = \mu + K_o [\eta] \quad (5.23)$$

$$c_c = 2 (k/m)^{(1/2)} \quad (5.24)$$

$$\xi = c / c_c = c / [2 (k/m)^{(1/2)}] \quad (5.25)$$

$$\omega_n \quad : \text{ pulsation naturelle d'amortissement} \quad (5.26)$$

$$\omega_n^2 = (k/m) = z \quad : \text{ gain en déplacement du contrôle} \quad (5.27)$$

$$2\xi\omega_n = (c/m) = \dot{z} \quad : \text{ gain en vitesse du contrôle} \quad (5.28)$$

$$\ddot{U} + (c/m) \dot{U} + (K/m) U = (c/m) \dot{y} + (K/m) Y \quad (5.29)$$

$$\ddot{U} + (2\xi \omega_n) \dot{U} + \omega^2 U = (2\xi \omega_n) \dot{Y} + \omega^2 Y \quad (5.30)$$

$$\sigma = \sigma (t, U) = \sigma (\varepsilon, \sigma_a, E_H, G_K, \eta_K, C_{H-B}) = \sigma (t, \varepsilon, \sigma_0, E_0, \sigma_1, G_1, G_2, \eta_2, c_3) \quad (5.31)$$

$$\text{Alors : } \quad \sigma = [ \sigma_0 + (\lambda_e \varepsilon_v + \mu_{c3} \varepsilon_e) + c_2 ] + (E\varepsilon + \eta \dot{\varepsilon}) \quad (5.32)$$

$$\text{Où : } \quad \sigma_t = \sigma (u, t) ; \quad \varepsilon_t = \varepsilon(u, t) \quad (5.33)$$

$$\sigma_{\text{axial}} = \sigma_a = \sigma_0 ; \quad \varepsilon_{\text{axial}} = \varepsilon_a = \varepsilon_0 ; \quad c_3 = \Theta = \text{Constante} \quad (5.34)$$

$$\lambda_e = K - (2/3) G \text{ (élasticité)} ; \quad \lambda_p = \tau_{\text{oct}} / \gamma_{\text{oct}} = \sigma/2 \dot{\varepsilon} \text{ (plasticité)} \quad (5.35)$$

Détermination de l'équation différentielle en q\*

$$\text{Dans le plan p et q : } \quad \varepsilon(t) = \frac{p}{E_H} + \frac{q}{G_K} + \frac{q}{\eta_K} + \frac{q}{\eta_M} + \left[ 1 - e^{-\left(\frac{G_K}{\eta_K}\right)t} \right] \quad (5.42)$$

a – Assimiler l'excavation à une ellipse (Figures 5.8 et 5.9) dont les axes p et q sont parallèles aux axes x et z, respectivement :

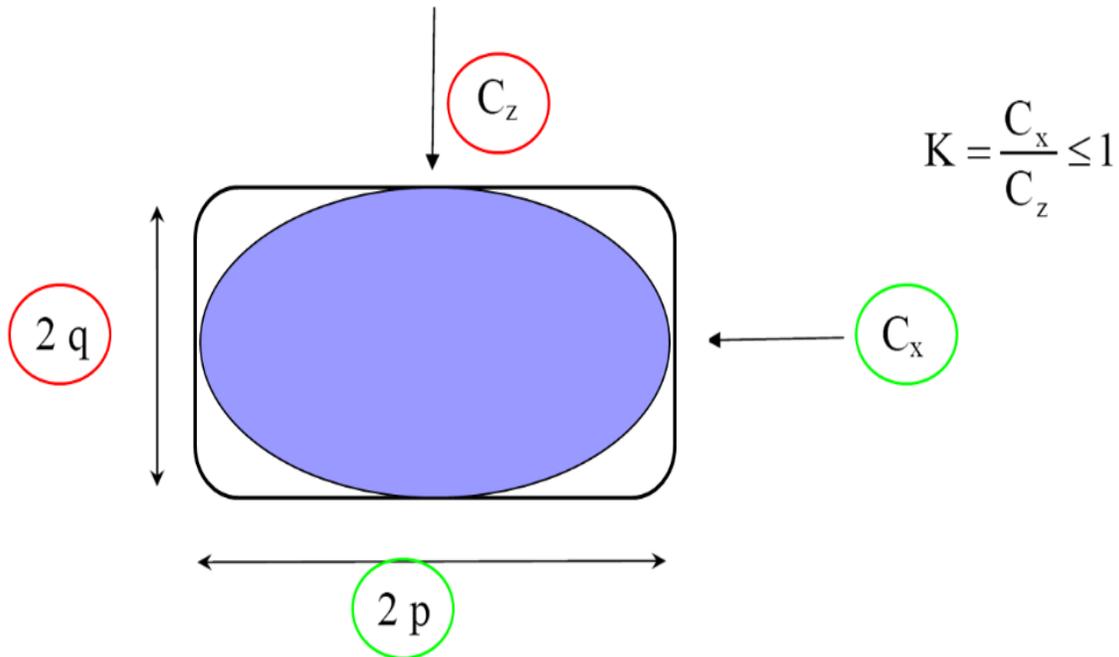


Figure 6.8 : L'ellipse définissant la zone d'influence autour de l'excavation (d'après Brady et Brown, 1985)

b- Calculer p et q à l'aide des 4 équations qui suivent et retenir la plus grande valeur :

Soient :

p : ½ la plus petite diagonale parallèle à l'axe x de l'ellipse de Brown & Brady

q : ½ la plus grande diagonale parallèle à l'axe z de l'ellipse de Brown & Brady

$$\bar{p} = q \left[ 10 \left| \frac{p}{q} \left( \frac{p}{q} + 2 \right) - K \left( 3 + 2 \frac{p}{q} \right) \right| \right]^{\frac{1}{2}} \quad \bar{p} = q \left[ 10 \left( K + \frac{p^2}{q^2} \right) + K \frac{p^2}{q^2} \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\bar{q} = q \left[ 10 \left| K \left( 1 + 2 \frac{p}{q} \right) - \frac{p}{q} \left( 3 \frac{p}{q} + 2 \right) \right| \right]^{\frac{1}{2}} \quad \bar{q} = q \left[ 10 \left( K + \frac{p^2}{q^2} \right) + 1 \right]^{\frac{1}{2}}$$

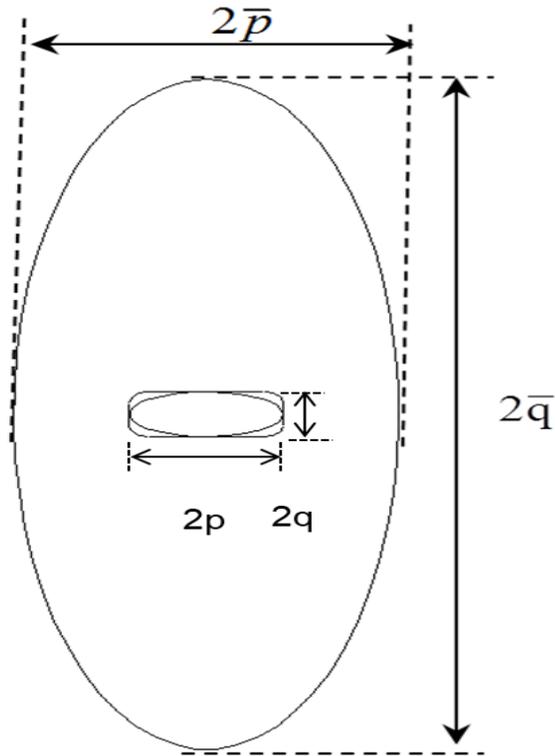


Figure 5.9 : L'ellipse <sup>52</sup> autour de l'excavation a pour axes 2 p et 2 q (d'après Brady et Brown, 1985)

Or, d'après l'Annexe F, on a :

$$q_{t=0}(\bar{r}=1) = \frac{2\bar{p}^2(P_{ext} - P_{int})}{\bar{p}^2 - 1} \quad (\text{Tube fini})$$

$$= \frac{2(P_{ext} - P_{int})}{1 - 1/\bar{p}^2} \xrightarrow{\bar{p} \rightarrow \infty} 2\sigma_0 \quad (\text{Tunnel profond non soutenu})$$

Finalement, pour une galerie circulaire sans revêtement à grande profondeur, l'expression donnant les déplacements en paroi est la suivante :

$$\forall t \quad U_i^* = 1 - \frac{2}{1 - 1/\bar{p}^2} \int_1^{\bar{p}} \frac{\varepsilon_r^{vp^*}}{\bar{r}} d\bar{r}$$

<sup>52</sup> Si p / q < 0.2 et K < 0.2, on ajoute 15 % à ces valeurs.

Il résulte :

$$\underline{q}^* = \frac{U_i^*}{\bar{r}^2} + \varepsilon_r^{vp*} \Rightarrow \frac{\partial \underline{q}^*}{\partial t^{*n}} = \frac{1}{\bar{r}^2} \frac{\partial U_i^*}{\partial t^{*n}} + \frac{\partial \varepsilon_r^{vp*}}{\partial t^{*n}}$$

Or, en dérivant l'équation ci-avant, on exprime :

$$\frac{\partial U_i^*}{\partial t^{*n}} = \frac{-2}{1-1/\bar{\rho}^2} \int_1^{\bar{\rho}} \frac{\partial \varepsilon_r^{vp*}}{\partial t^{*n}} \frac{d\bar{r}}{\bar{r}}$$

Par ailleurs, posons :

$$\Leftrightarrow \frac{\partial \underline{\varepsilon}_{vp}^*}{\partial t^{*n}} = -\frac{\partial \varepsilon_r^{vp*}}{\partial t^{*n}} = \underline{q}^{*\beta}$$

Finalement, la solution développée selon la méthode de l'ellipse dans le plan p, q :

$$\frac{\delta q}{\delta t} + q^\beta - \left(\frac{1}{r^2}\right) \left(\frac{2}{1-r_e^2}\right) \int_1^p \frac{q^\beta}{r} dr = 0 \quad (6.43)$$

Il est à noter : le régime permanent du fluage est atteint quand :  $\frac{\delta q}{\delta t} = 0$

L'équation de l'état asymptotique se réduit alors en :

$$q^\beta - \left(\frac{1}{r^2}\right) \left(\frac{2}{1-r_e^2}\right) \int_1^p \frac{q^\beta}{r} dr = 0$$

L'ensemble des développements mathématiques sont à l'Annexe F.

## 6.5 Conclusion

La rhéologie du matériau est favorisée pour développer le modèle.

Le Tableau 6.7 met en évidence les étapes de développement du modèle ciblé.

Tableau 5.7 : Étapes de développement du modèle utilisé et validé

MODÈLES Développés	CAS	FORMULATION DES ÉQUATIONS $\sigma = \sigma(t, U) = \sigma(t, \varepsilon, E_H, G_K, \eta_K, \sigma_s) = 0$	No. Équation
Modèle Intact	Si : $\sigma \leq \sigma_s$	$\sigma + \left(\frac{\eta_K}{E_H + G_K}\right) \dot{\sigma} = \left[\left(\frac{E_H G_K}{E_H + G_K}\right) \varepsilon + \left(\frac{E_H G_K}{E_H + G_K}\right) \dot{\varepsilon}\right]$	(5.36)
	Si : $\sigma > \sigma_s$	$\sigma - \sigma_s + \left(\frac{1}{E_H} + \frac{\eta_K}{G_K}\right) \dot{\sigma} + \left(\frac{\eta_K}{E_H G_K}\right) \ddot{\sigma} = \eta_2 \dot{\varepsilon} + \left(\frac{\eta_K}{G_K}\right) \ddot{\varepsilon}$	(5.37)
Modèle avec FLUAGE (viscoélastique)	Si $\sigma \leq \sigma_s$	$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_H} + \frac{\sigma}{G_K} \left(1 - e^{-\left(\frac{G_K}{\eta_K}\right)t}\right)$	(5.38)
	Si : $\sigma > \sigma_s$	$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_H} + \frac{\sigma}{G_K} \left(1 - e^{-\left(\frac{G_K}{\eta_K}\right)t}\right) + (\sigma - \sigma_s) t$	(5.39)
Modèle avec FLUAGE + DOMMAGE (viscoplastique)	Si $\sigma^* \leq \sigma_s$	$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_H} + \frac{\sigma}{G_K} \left(1 - e^{-\left(\frac{G_K}{\eta_K}\right)t}\right)$	(5.40)
	Si : $\sigma^* > \sigma_s$	$\varepsilon = \frac{\sigma^*}{E_H} + \frac{\sigma^*}{G_K} \left(1 - e^{-\left(\frac{G_K}{\eta_K}\right)t}\right) + (\sigma - \sigma_s) t$	(5.41)
Modèle Hooke (1) + Kelvin (2)	Méthode de l'ellipse dans le plan p, q (Fig. 5.6 et 5.7)	$\varepsilon(t) = \frac{p}{E_H} + \frac{q}{G_K} + \frac{q}{\eta_K} + \frac{q}{\eta_M} + \left[1 - e^{-\left(\frac{G_K}{\eta_K}\right)t}\right]$	(5.42)

Une solution admissible pour l'état des contraintes transitoire est la suivante :

$$q^*(u,t) = u \left[1(\beta - 1)u^{\beta-1} t\right]^{\frac{1}{1-\beta}} + \frac{u^{\frac{1}{\beta}}}{\beta} \left[1 - (1 + (\beta - 1)u^{\frac{1}{1-\beta}} t)\right]^{\frac{1}{1-\beta}} \quad (5.43)$$

où :

$q$ , déviateur exprimé dans le repère cylindrique :  $q = ( \sigma_1 - \sigma_3 ) > 0$

$\beta$ , constante :  $\beta = ( 2\sigma_0 ) / q$  ,  $\beta \in [ 1, 3 ]$

$u$ , déformation du massif rocheux :  $u = 1/r^2$

$\rho$ , rayon extérieur réduit du demi-cylindre suffisamment grand :  $r_e \gg r$

Compte tenu de la complexité de l'état transitoire défini (Équation différentielle 6.43), il m'est donné ici que les justifications de la solution analytique retenue. On peut montrer numériquement que  $q^*$  vérifie bien les cinq conditions nécessaires suivantes :

$$1. \int_0^1 \frac{\partial \underline{q}^*}{\partial t^*} \frac{du}{u} = 0$$

$$2. \int_0^1 \underline{q}^* \frac{du}{u} = 1$$

$$3. \frac{\partial \underline{q}^*}{\partial t^*} (u, t^* = 0) = -u^\beta + \frac{u}{\beta}$$

$$4. \underline{q}^*(u, t^*) \xrightarrow{t^* \rightarrow \infty} \frac{u^\beta}{\beta}$$

$$5. \underline{q}^*(u, t^* = 0) = u$$

De ce fait, l'adhésion à une approche hybride donnera de la robustesse au modèle développé. Et la Figure 6.10 est le résultat du cas pratique obtenu à partir des six équations déduites. Elle schématise et décrit tout aussi la rhéologie du modèle à développer et à implémenter de type viscoélastique avec écrouissage légèrement neutre.

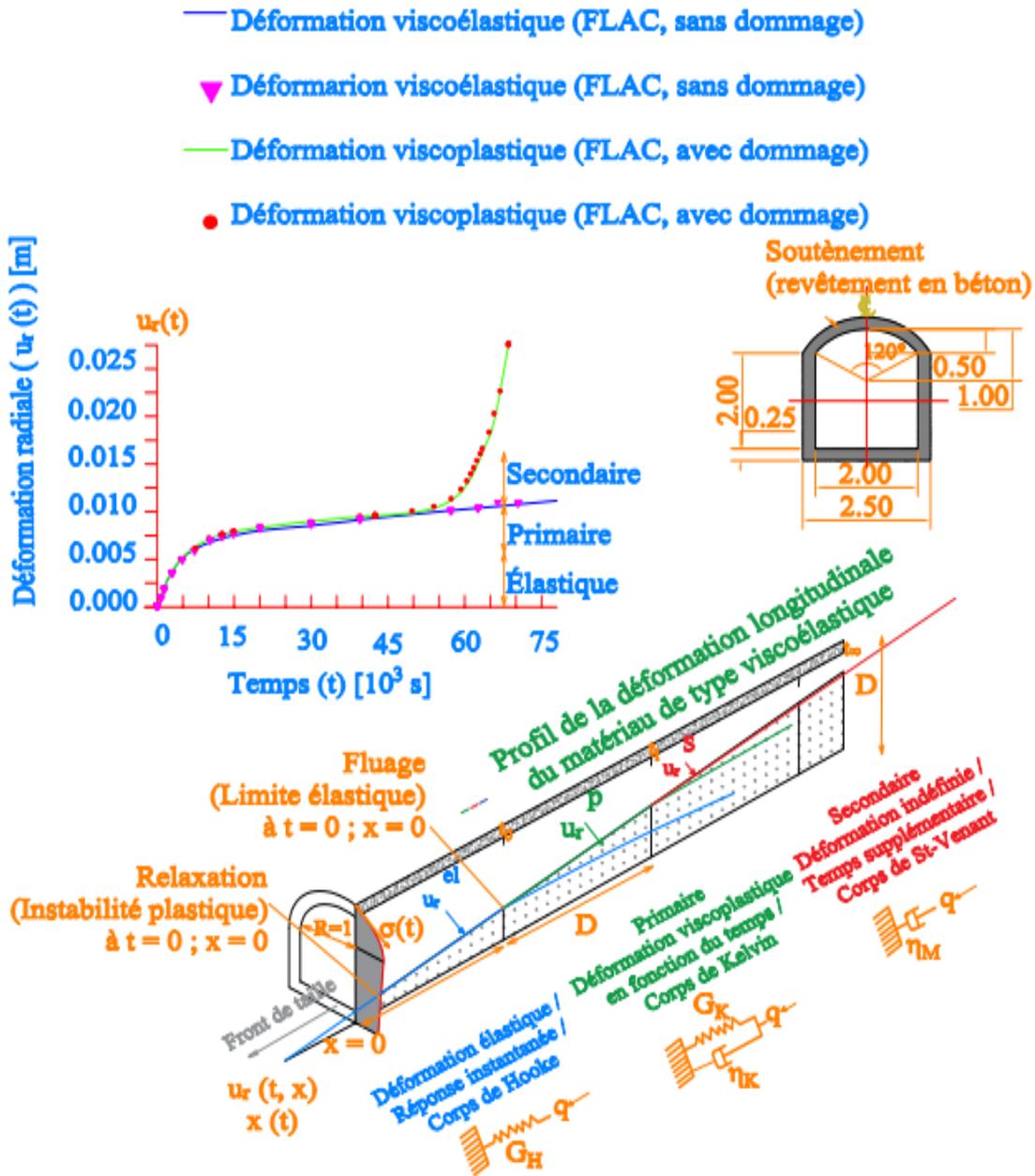


Figure 5.10 : Développement du modèle rhéologique ciblé - Caractéristiques de la distorsion du massif rocheux de Sedren – Détails : le modèle et la courbe de fluage primaire et secondaire agrandie - Les effets de l'avancement du tunnel et du temps sur les déplacements radiaux totaux observés dans les parois du tunnel sont représentés et exprimés sous la forme du PDL d'un tunnel en D sans support dans un milieu viscoplastique (où :  $r$  est le rayon du tunnel,  $D$  est la hauteur maximale du tunnel,  $t$  désigne le temps,  $x(t)$  désigne la profondeur de la face du tunnel,  $u_r(t, x)$  se réfère au déplacement radial de la paroi du tunnel,  $\sigma(t)$  est la contrainte appliquée, les indices M, K, y se réfèrent respectivement aux modèles Kelvin et Maxwell et au seuil d'élasticité);  $p$  : courbe de déformation viscoplastique ;  $q$  : contrainte de confinement exercée ;  $t$  : temps ;  $x$  : déplacement.;  $u_r$  : déformation au stade de fluage  $r$  ;  $\epsilon_l$  : mesure de fluage initial;  $S$  : Courbe de fluage. Les unités sont en SI; les mesures sont en mètres.

## CHAPITRE 6

### ANALYSE STRUCTURALE DU GÉOSYSTÈME MÉCANIQUE

La *Théorie de commande de systèmes asservis* dans l'espace d'état utilise la *Transformée de Laplace*. Cette théorie est vaste de concepts et d'une double approche (*classique* et / ou *moderne*). Dans ce chapitre, l'asservissement et la régulation du système géomécanique développé seront analysés par modélisation d'état à mode variable pour tenir compte du comportement différé du massif rocheux confiné lors et après excavation .

*L'approche classique*<sup>53</sup> est de la catégorie des Fonctions de Transfert. Toute l'analyse se fait dans le domaine complexe ou fréquentiel. Malgré la facilité d'utilisation, elle a l'inconvénient majeur d'être limitée aux systèmes linéaires, invariants dans le temps et avec des conditions initiales nulles.

*L'approche moderne*<sup>54</sup> est générale et peut être utilisée pour représenter les systèmes non-linéaires variant dans le temps. Elle favorise plusieurs entrées et sorties et elle est un outil parfait pour l'étude de la commande optimale. Le formalisme matriciel des variables d'état et son algèbre constituent une technique élégante et puissante d'écrire et de véhiculer les variables multiples et leurs interconnexions.

Et le code Matlab est l'outil puissant de choix pour une telle approche dite moderne et / ou classique.

#### 6.1 Le code de description du modèle de variables d'état

De façon générale, le schéma-bloc de modélisation du géosystème asservi est illustré selon la Figure 4.2.

Considérant l'équation différentielle d'ordre  $n$  pour sa résolution :

---

<sup>53</sup> Les systèmes de commande sont représentés par des Fonctions de Transfert à Boucle Fermée (FTBF).

<sup>54</sup> Les systèmes de commande sont représentés par des équations différentielles. En général, ils sont définis par  $n$  équations différentielles d'ordre  $n$  à  $n$  variables d'états.

$$\dot{X}_n = f(X, \dot{X}, \ddot{X}, \dots, X^{n-1}, U, t) \quad (6.1)$$

Où :

$$\begin{aligned} X_1 &= X \\ X_2 &= \dot{X} \\ &\dots \\ X_n &= X^n \end{aligned}$$

Alors :

$$\begin{aligned} \dot{X}_1 &= X_2 \\ \dot{X}_2 &= X_3 \\ &\dots \\ \dot{X}_n &= X_n \end{aligned}$$

$$\dot{X}_n = f(X_1, X_2, \dots, X_n; U_1, U_2, \dots, U_r, t) \quad (6.2)$$

Théoriquement, si le système n'est pas aussi petit de telle sorte qu'il est compliqué, il devient nécessaire d'utiliser des vecteurs et des matrices pour simplifier la notation. Réécrivant les équations des alinéas 7.1, on obtient sous la forme vectorielle :

$$\dot{X} = f(X, U, t); \quad X_i = f_i(X, \dot{X}, \ddot{X}, \dots, X^n; U_1, U_2, \dots, U_r, t); \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (6.3)$$

$$Y = g(X, U, t); \quad Y_j = g_j(X, \dot{X}, \ddot{X}, \dots, X^n; U_1, U_2, \dots, U_r, t); \quad (j = 1, 2, \dots, m; m \leq n)$$

Où  $X, Y, U, f(X, U, t)$  et  $g(X, U, t)$  sont définis par :

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}; \quad Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_m \end{bmatrix}; \quad U = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_1 \\ \vdots \\ u_r \end{bmatrix}, \quad (6.4)$$

$$f(X, U, t) = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad g(X, U, t) = \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ \vdots \\ g_m \end{bmatrix}, \quad (6.5)$$

## 6.2 Résolution du modèle numérique simple ciblé

Une approche moderne est employée; celle de la synthèse fréquentielle et de commande optimale de systèmes multivariables. Soit la méthode de contrôle de systèmes asservis de variables d'état. Appliquant la transformée de Laplace dans l'espace d'état de sorte que :

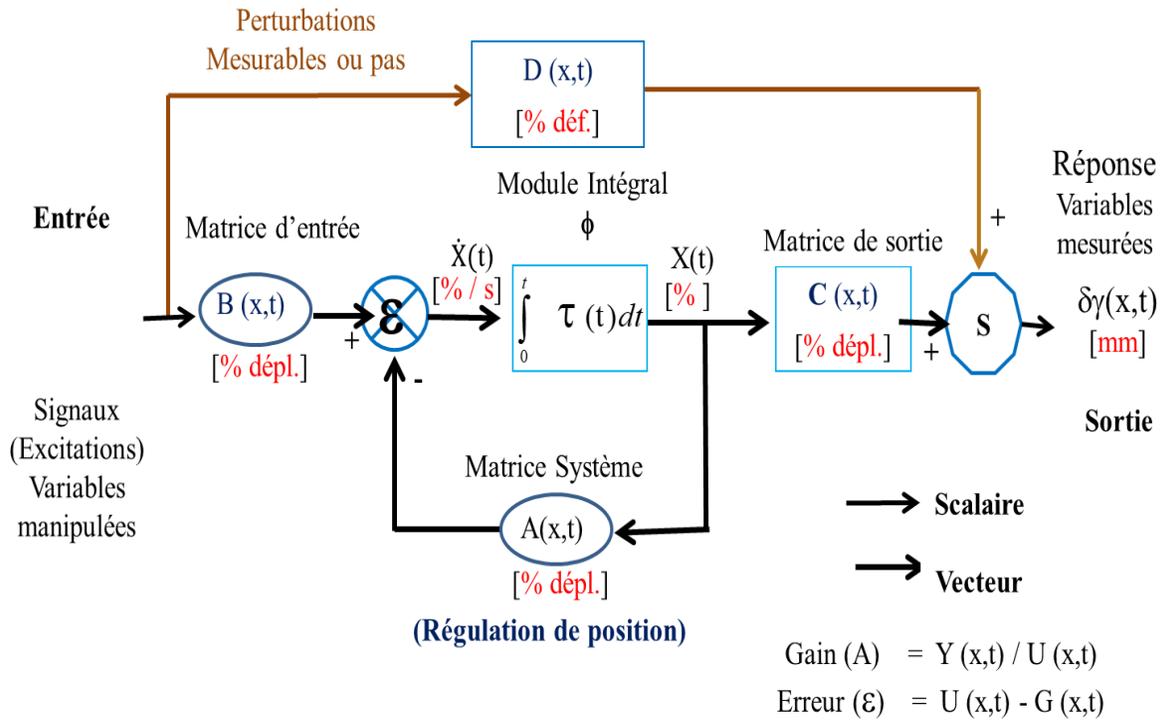


Figure 6.1 : Schéma-bloc du système géomécanique à variables d'état

Le schéma-bloc de modélisation du système géophysique identifié linéaire et couplé est illustré selon la Figure 6.1.

Pratiquement, nous avons recours à une hybridation de 2 approches (classique et moderne) pour la formulation de notre modèle.

Le système est linéaire en X et U.

Nous pouvons écrire l'ensemble d'équations différentielles de 1<sup>er</sup> ordre de la façon suivante :

$$\dot{X}(t) = A X(t) + B U(t) ; \quad (6.6)$$

$$Y(t) = C X(t) + D U(t) \quad (6.7)$$

avec des conditions initiales qui sont  $x(0) = 0$  et  $t(0) = 0$ .

Où :

$$A(t) = \begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & \ddots & a_{2n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} : \text{Gain / matrice de dimension } n \times n \quad [ \% \text{ déplacement} ] ;$$

$$B(t) = \begin{bmatrix} b_{11} & \cdots & b_{1r} \\ b_{21} & \ddots & b_{2r} \\ \vdots & & \vdots \\ b_{n1} & \cdots & b_{nr} \end{bmatrix} : \text{déplacement enregistré à l'entrée de dimension } n \times m \quad [ \% \text{ déplacement} ] ;$$

$$C(t) = \begin{bmatrix} c_{11} & \cdots & c_{1n} \\ c_{21} & \ddots & c_{2n} \\ \vdots & & \vdots \\ c_{m1} & \cdots & c_{mn} \end{bmatrix} : \text{déplacement mesuré à la sortie de dimension } r \times n \quad [ \% \text{ déplacement} ] ;$$

$$D(t) = \begin{bmatrix} d_{11} & \cdots & d_{1r} \\ d_{21} & \ddots & d_{2r} \\ \vdots & & \vdots \\ d_{m1} & \cdots & d_{mr} \end{bmatrix} : \text{déplacement transmis à la sortie de dimension } r \times m \quad [ \% \text{ déplacement} ] ;$$

$\phi$  [ % déplacement / s ] : Flux (Champ d'effort) ;

$X$  [ mm ] =  $X(t)$  : Vecteur d'état de position de dimension  $n$  ;

$\dot{X}$  [ % / s ] =  $\dot{X}(t)$  : Vecteur d'état du taux de mobilité de dimension  $n$  ;

$\delta\gamma$  [  $\mu\text{m}$  ] =  $\delta Y(t)$  : Vecteur de déplacement de sortie de dimension  $r$  ;

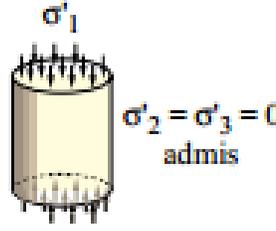
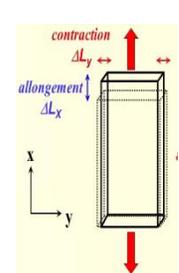
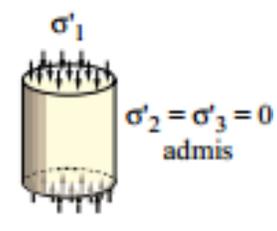
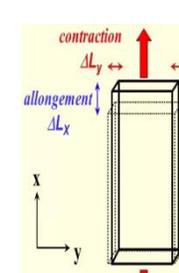
$\in\%$  , erreur commise dans le système géotechnique simplifié .

Tableau 6.1 : Paramètres viscoélastiques & viscoplastiques pour l'analyse du fluage

DESCRIPTION	SYMBOLES	FORMULES	Matériaux	
<p>Domaine des zones du modèle rhéologique</p>		<p>Cf. Section 3.2 : Types de modèles rhéologiques pour des détails</p>	<p>Visco-élastique (ve) Quartzite + Porphyres + Marbre + Granodiorite + Basalte*  Etc.</p>	<p>Visco-plastique (vp) Quartzite + Porphyres + Marbre + Granodiorite + Basalte*  Etc.</p>
Contrainte uniaxiale de compression de la roche intacte	$\sigma_{ci}$ [MPa]	Tableau 1.3	295	65.814
Module de Young d'un matériau intact (granite ou basalte)	$E_0$ [MPa]	Pente courbe expériment. $\sigma$ vs $\epsilon$	70 000	47 350
Module déformation du massif rocheux	$G_0$ [MPa]	Tableau 6.2	29 717	60 469
Ratio Poisson du massif rocheux	$\nu$	Tableau 6.2	0.21	0.21
Perte structurale du matériau	$\omega$	Propriétés	0.45	0.45
Taux d'amort. Coulomb d'un granite	$c$ [MPa]	essai triaxial	7.328	7.328
Paramètre qui limite l'angle de friction	$\phi_c$ [°]	essai triaxial	62.90°	62.90°
Facteur de friction sec d'un rocher contre rocher (granite et basalte)	$\sigma_s$ [MPa]	$\sigma_\sigma = \mu$	0.50	0.50
Amortissement structural d'un granite ou d'un basalte	$K$ [MPa]	Cf. Propriétés	3 987	$K_{vp}$
Module de cisaillement (Kelvin)	$G^K$ [MPa]	Annexe G (Paraskevopoulou C., Diederichs M., 2013)	498.1	498.1
Module de cisaillement (Maxwell)	$G^M$ [MPa]	Idem	566.0	566.0
Perte structurale d'un granite (Kelvin)	$\eta^K$ [MPa-s]	Idem	8.82 10 <sup>6</sup>	8.82 10 <sup>6</sup>
Perte structurale d'un granite (Maxwell)	$\eta^M$ [MPa-s]	Idem	1.34 10 <sup>6</sup>	1.34 10 <sup>6</sup>
Module de viscosité initiale	$\eta_0$ [MPa-j]	Donnée calée	1736	$\eta_0$

Les variables d'état se trouvant dans le Tableau 6.1 sont calculés d'après une analyse de sensibilité des paramètres viscoélastiques de l'Appendice D et vérifiés d'après les formules se trouvant dans le Tableau 6.2 puisque les relations entre les modules et les déformations sont les suivantes :

Tableau 6.2: Relations entre les modules et les déformations

	PHASE VISCOÉLASTIQUE (ve)			PHASE VISCOPLASTIQUE (vp)				
DESCRIPTION	 <p><math>\sigma_1</math> <math>\sigma_2 = \sigma_3 = 0</math> admis</p>		 <p>contraction <math>\Delta L_y</math> allongement <math>\Delta L_x</math></p>		 <p><math>\sigma_1</math> <math>\sigma_2 = \sigma_3 = 0</math> admis</p>		 <p>contraction <math>\Delta L_y</math> allongement <math>\Delta L_x</math></p>	
	$\sigma = E_e \cdot \epsilon_e$ $\nu = -\frac{\epsilon_v}{\epsilon_h} = -\frac{\sigma_v}{\sigma_h} =$ $\frac{1 - \sin(\varphi')}{2 - \sin(\varphi')}$ <p>où <math>\nu \in [0.20, 0.50]</math></p>		$K = \frac{\sigma}{3\epsilon}$ <p>où <math>\epsilon = \frac{\Delta L_x}{L_x}</math></p>		$\sigma = E_{vp} \cdot \epsilon_{vp}$ $\nu = -\frac{\epsilon_v}{\epsilon_h} = -\frac{\sigma_v}{\sigma_h} =$ $\frac{1 - \sin(\varphi')}{2 - \sin(\varphi')}$ <p>où <math>\nu \in [0.20, 0.50]</math></p>		$K = \frac{\sigma}{3\epsilon}$ <p>où <math>\epsilon = \frac{\Delta L_x}{L_x}</math></p>	
Données	$E\sigma_e = ?$ [MPa]	$\nu = ?$	$K_e = ?$ [MPa]	$E_{vp} = ?$ [MPa]	$\nu = ?$	$K_{vp} = ?$ [MPa]		
G, E	$E_e = \frac{\sigma_e}{\epsilon_e} = \frac{300}{0.005} = 70\ 000$	$\frac{E - 2G}{9K - E}$	$\frac{GE}{3(3G - E)}$	$E_{vp} = \frac{\sigma_{vp}}{\epsilon_{vp}} = \frac{265}{0.005} = 47\ 350$	$\frac{E - 2G}{9K - E}$	$\frac{GE}{3(3G - E)}$		
G, $\nu$	$2G(1 + \nu)$	$\nu = 0.21$	$\frac{3G(1 + \nu)}{3(1 - 2\nu)}$	$\frac{G_{vp}}{E_e E_{vp}} = \frac{47\ 350}{70\ 000 \cdot 47\ 350} = 0.21$	$\nu = 0.21$	$\frac{3G(1 + \nu)}{3(1 - 2\nu)}$		
G, K	$\frac{9KG}{3K + G}$	$\frac{3K - 2G}{6K + 2G}$	$K_e = 23\ 333$	$\frac{9KG}{3K + G}$	$\frac{3K - 2G}{6K + 2G}$	$K_{vp} = 15\ 783$		
E, $\nu$	$E_e = 70\ 000$	$\nu = 0.21$	$\frac{E}{3(1 - 2\nu)}$	$E_{vp} = 47\ 350$	$\nu = 0.21$	$\frac{E}{3(1 - 2\nu)}$		
E, K	$E_e = 70\ 000$	$\frac{3K - E}{3K + G}$	$K_e = 23\ 333$	$E_{vp} = 47\ 350$	$\frac{3K - E}{3K + G}$	$K_{vp} = 15\ 783$		
$\nu$ , K	$3K(1 - 2\nu)$	$\nu = 0.21$	$K_e = 23\ 333$	$3K(1 - 2\nu)$	$\nu = 0.21$	$K_{vp} = 15\ 783$		

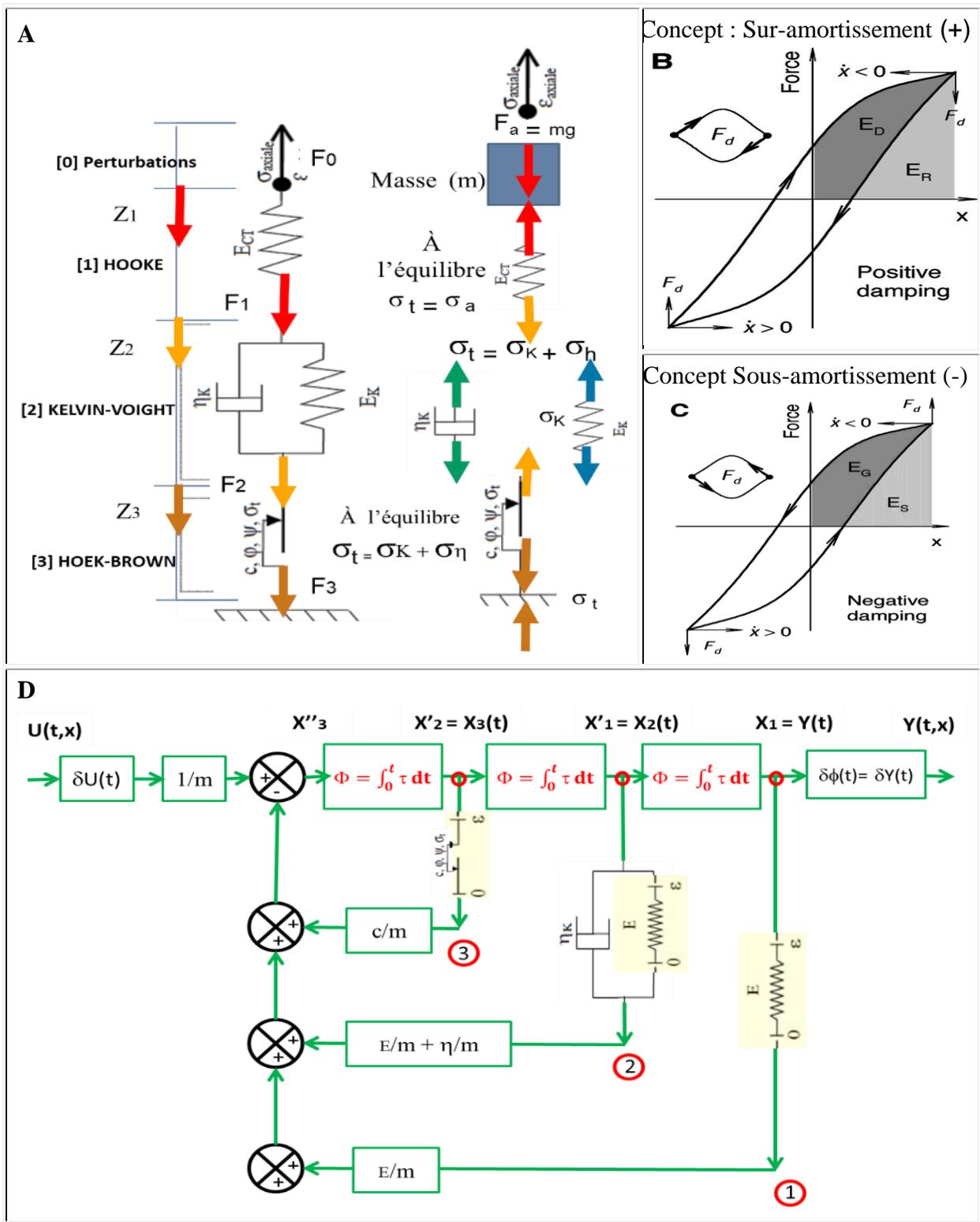


Figure 6.2 : Schéma-bloc du système asservi avec dérivées à la source (Adapté de Ogata, 1990)

Il est à noter : les sorties des intégrateurs sont des variables d'état selon la Figure 6.2 qui illustrent le modèle tenant compte des 4 corps (ressorts, amortisseur et patin). Aucune dérivée en U(t) n'interviendra.

Soient :

$$X_1(t) = Y(t) \Rightarrow \dot{X}_1(t) = X_2(t) \quad (6.8)$$

$$X_2(t) = \dot{Y}(t) \Rightarrow \dot{X}_2(t) = X_3(t) \quad (6.9)$$

$$X_3(t) = \ddot{Y}(t) \Rightarrow \dot{X}_3(t) = X_4(t) = a_0 U(t) - [(k + \mu_c) Y(t) + \eta Y'(t)] \quad (6.10)$$

$$\Rightarrow \dot{X}_3(t) = \dot{X}_3(t) = X_4(t) = a_0 U(t) - [(k + \mu_c) X_1(t) + \eta X_2(t)] \quad (6.11)$$

$$\Rightarrow \dot{X}_2(t) = X_5(t) = X_3(t) \quad (7.5)$$

$$\Rightarrow \dot{X}_1(t) = X_6(t) = X_2(t) \quad (7.5)$$

Et sa forme générale est la suivante :

$$\dot{X}(t) = A X(t) + B u(t) \quad (6.12)$$

$$Y(t) = C X(t) + D u(t) \quad \text{Où : } X(0) = X_0 ; D = 0 \quad (6.13)$$

Considérons le modèle équivalent d'état perturbé de 3 paramètres (masse, rigidité, amortissement):

$$m \ddot{Y}(t) + \eta_{vp} \dot{Y}(t) + (E_e + c) Y(t) = \sigma U(t) \quad (6.14)$$

$$\text{où : } \sigma = \sigma_{\text{élastique}} + \sigma_{\text{visqueuse}} = (\sigma_0 \cos\theta) \sin \omega t + (\sigma_0 \sin\theta) + \sin(\omega t + \phi) \quad (6.15)$$

$$K_e = (\eta_{vp} K_{vp}) / \omega = 20\,000 \text{ MPa (Amortissement structural d'un quartzite)} \quad (6.16)$$

$$\eta_{vp} = (E_{vp} / E_e) K_{vp} / \omega = (0.79 * 35\,783) / 0.45 = 62 \text{ MPa-j (Perte structurale d'un quartzite)} \quad (6.17)$$

$$c = (4\mu cN) / (\pi \omega X) = 7.328 \text{ MPa (Taux d'amort. Coulomb d'un quartzite rocheux)} \quad (6.18)$$

$$\text{tg}\theta = E_{vp} / E_e = 47\,350 / 70\,000 \text{ MPa} = \sin\theta / \cos\theta = \text{tg } 62.90^\circ = 0.79 \quad (6.19)$$

$$\mu c = 0.50 \text{ [MPa]} \quad (\text{Facteur de friction sec d'un rocher contre rocher}) \quad (6.20)$$

$$E_e = \sigma \cos\theta / \varepsilon_0 = 70\,000 \text{ MPa (Module de Young du matériau élastique)} \quad (6.21)$$

$$E_{vp} = \sigma \sin\theta / \varepsilon_0 = 47.350 \text{ GPa} = 47\,350 \text{ MPa (Module de Young du matériau viscoplastique)} \quad (6.22)$$

D'autres détails sont nécessaires. Soit le Tableau 6.3 combinant les corps de la matrice de gain (A) selon la *méthode fonction de transfert*.

Tableau 6.3 : Analyse des paramètres (masse, rigidité , amortissement) combinés de la matrice de la fonction de transfert  
( Adapté de Hatch, 2000 )

MODÈLES	Degré de liberté 1	Degré de liberté 2	Degré de liberté 3
(0) Masse (gravitation)	[m] [0] [0]	[0] [m] [0]	[0] [0] [m]
(1) Corps de Hooke (élasticité)	+ [K <sub>1</sub> ] - [K <sub>1</sub> ] [0]	- [K <sub>1</sub> ] + [K <sub>1</sub> ] [0]	[0] [0] [0]
(2) Corps de Kevin-Voight (élasto-visqueuse)	+ [K <sub>2</sub> + η <sub>2</sub> ] - [K <sub>2</sub> + η <sub>2</sub> ] [0]	- [K <sub>2</sub> + η <sub>2</sub> ] + [K <sub>2</sub> + η <sub>2</sub> ] [0]	[0] [0] [0]
(3) Corps de St-Venant (plasticité)	[0] [0] [0]	[0] + [C <sub>3</sub> ] - [C <sub>3</sub> ]	[0] - [C <sub>3</sub> ] + [C <sub>3</sub> ]
(4) MODÈLE CIBLÉ (élasto-viscoplastique)	[K <sub>1</sub> ] + [K <sub>2</sub> + η <sub>2</sub> ] - [K <sub>1</sub> ] - [K <sub>2</sub> + η <sub>2</sub> ] [0]	- [K <sub>1</sub> ] - [K <sub>2</sub> + η <sub>2</sub> ] [K <sub>1</sub> ] + [K <sub>2</sub> + η <sub>2</sub> ] + [C <sub>3</sub> ] - [C <sub>3</sub> ]	[0] - [C <sub>3</sub> ] + [C <sub>3</sub> ]

Alors la matrice d'entrée (A) est

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \mathbf{1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -K_1/m & 0 & k_1/m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mathbf{1} & 0 & 0 \\ K_1/m & 0 & -(K_1 + K_2)/m & -\eta_2/m & (K_2 + c_3)/m & -c_3/m \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mathbf{1} \\ 0 & 0 & K_2/m & \eta_2/m & -(K_2 + c_3)/m & c_3/m \end{bmatrix} \quad (6.23)$$

Pour résoudre notre problème, considérons une entrée, une sortie (n > ou = 1).

Posons :

$$x_1 = z_1 \quad \text{Position de Masse à 1} \quad \dot{z}_1 = x_2 = \dot{x}_1 \quad (6.24)$$

$$x_2 = \dot{z}_1 \quad \text{Vitesse de Masse à 1} \quad \dot{z}_2 = x_4 = \dot{x}_3 \quad (6.25)$$

$$x_3 = z_2 \quad \text{Position de Masse à 2} \quad \dot{z}_3 = x_6 = \dot{x}_5 \quad (6.26)$$

$$x_4 = \dot{z}_2 \quad \text{Vitesse de Masse à 2} \quad \dot{z}_1 = \dot{x}_2 \quad (6.27)$$

$$x_5 = z_3 \quad \text{Position de Masse à 3} \quad \dot{z}_2 = \dot{x}_4 \quad (6.28)$$

$$x_6 = \dot{z}_3 \quad \text{Vitesse de Masse à 3} \quad \dot{z}_3 = \dot{x}_6 \quad (6.29)$$

Par algèbre matricielle, on obtient les relations :

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{Z}_1 \\ \ddot{Z}_2 \\ \ddot{Z}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \eta_2 & \eta_2 & 0 \\ \eta_2 & \eta_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{Z}_1 \\ \dot{Z}_2 \\ \dot{Z}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_1 + K_2 & -K_1 - K_2 & 0 \\ -K_1 - K_2 & -K_1 - K_2 + C_3 & -C_3 \\ 0 & -C_3 & +C_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} \quad (6.30)$$

$$\text{Posons : } m = m_1 = m_2 = m_3 = 1 \text{ kg} \quad (6.31)$$

Alors, nous écrivons l'équation d'état simplifiée de la sorte :

$$\dot{X}(t) = A X(t) + B U(t)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \\ \dot{X}_3 \\ \dot{X}_4 \\ \dot{X}_5 \\ \dot{X}_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_1}{m} & 0 & \frac{K_1}{m} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{K_1}{m} & 0 & -\frac{(K_1+K_2)}{m} & -\frac{\eta_2}{m} & \frac{(K_2+c_3)}{m} & -\frac{c_3}{m} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \frac{K_2}{m} & \frac{\eta_2}{m} & -\frac{(K_2+c_3)}{m} & \frac{c_3}{m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ X_5 \\ X_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{F_1}{m} \\ 0 \\ \frac{F_2}{m} \\ 0 \\ \frac{F_3}{m} \end{bmatrix} \quad (6.32)$$

Utilisant la Transformée de Laplace de :

$$\mathcal{L}\{\dot{x}\}(s) = \mathcal{L}\{Ax\}(s) + \mathcal{L}\{Bu\}(s) \quad (6.33)$$

$$sX(s) - x(0) = A \mathcal{L}\{x\}(s) + B \mathcal{L}\{u\}(s) \quad (6.34)$$

$$sX(s) - x(0) = A\{X\}(s) + B\{U\}(s) \quad (6.35)$$

$$X(s) = ?$$

$$sX(s) - A\{X\}(s) = X(0) + B\{U\}(s) \quad (6.36)$$

$$(sI - A) X(s) = X(0) + B\{U\}(s) \quad (6.37)$$

$$X(s) = (sI - A)^{-1} x(0) + (sI - A)^{-1} B U(s) \quad (6.38)$$

$$\text{Où : } X(0) = X_0 = 0 ; \quad D = 0$$

$$\Rightarrow X(s) = (sI - A)^{-1} (X_0 + B U(s)) \quad (6.39)$$

$$\text{Posons : } X = Z \quad (6.40)$$

$$Z(t) = C X(t) \quad (6.41)$$

$$\Rightarrow Z(s) = C X(s) \quad (6.42)$$

$$F1 : B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{F1}{m} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad F2 : B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{F2}{m} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad F3 : B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{F3}{m} \end{bmatrix}, \quad (6.43)$$

$$\Rightarrow Y(s) = C X(s) = C [(sI - A)^{-1} (X_0)] + C [(sI - A)^{-1} B U(s)] \quad (6.44)$$

Avec la fonction de transfert pour le système défini par :

$$H(s) = [C (sI - A)^{-1} B] \quad (6.45)$$

Une fonction de transfert n'est définie que pour des systèmes linéaires.

$$\text{On requiert : } X_0 = 0. \quad (6.46)$$

$$\text{Où le gain : } G(s) = Z(s) / U(s) = C(sI - A)^{-1} B \quad (6.47)$$

Ainsi, la matrice de sortie (Y) est :

$$\begin{pmatrix} Y_1 \\ \vdots \\ Y_i \\ \vdots \\ Y_6 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ \vdots \\ X_i \\ \vdots \\ X_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ Y_i \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} (1) \quad (6.48)$$

$$\text{Où} \quad X_1 = Y_1 \quad (= Z_1) \quad (6.49)$$

$$X_2 = Y_2 \quad (= \dot{Z}_1) \quad (6.50)$$

$$X_3 = Y_3 \quad (= Z_2) \quad (6.51)$$

$$X_4 = Y_4 \quad (= \dot{Z}_2) \quad (6.52)$$

$$X_5 = Y_5 \quad (= Z_3) \quad (6.53)$$

$$X_6 = Y_6 \quad (= \dot{Z}_3) \quad (6.54)$$

### 6.3 Présentation de solutions variantes

La recherche de solutions à notre modèle est fait selon l'approche hybride *Modèle d'état / Fonction de transfert* codifié selon MatLab. Et deux (2) approches s'imposent pour les réponses.

#### 6.3.1 L'approche fréquentielle classique

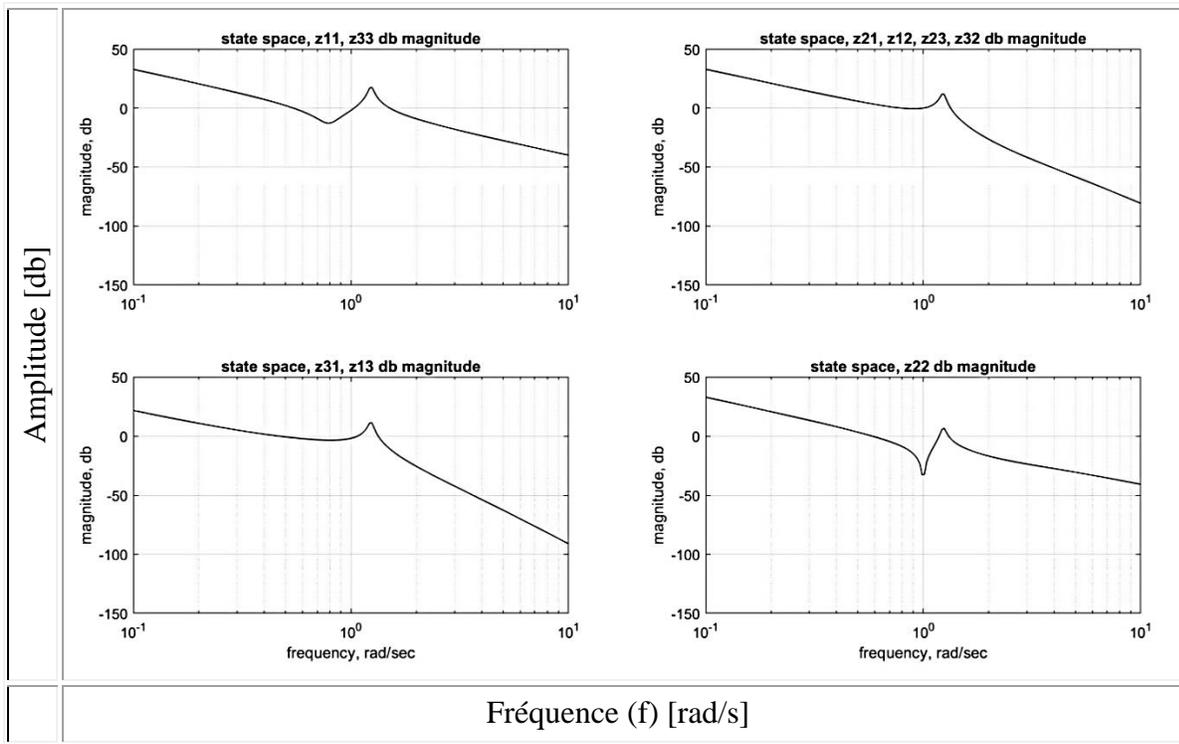
L'approche fréquentielle consiste à prédire comment réagit une structure lorsqu'elle est soumise à une ou plusieurs excitations dynamiques. Elle est basée sur l'analyse<sup>55</sup> des réponses fréquentielles ou permanentes du système (lorsque l'entrée est un harmonique). Des tests<sup>56</sup> de vibration sont faits en choisissant l'excitation par la base. Et le protocole veut que : a) Les balayages en fréquence pour obtenir les signatures avant et après l'excitation représentant les environnements lanceurs soient sévères. La validation de l'intégrité de l'infrastructure est justifiée si aucun dommage n'est causé. De là, son comportement dynamique sera similaire.

À la lumière de ces deux graphiques (Figures 6.3 et 6.4), nous constatons qu'il y aura dommages puisque le comportement de l'infrastructure ne sera plus similaire. Le principe de l'interaction entre les défaillances (due aux vibrations et aux forces) répondent à notre problématique.

---

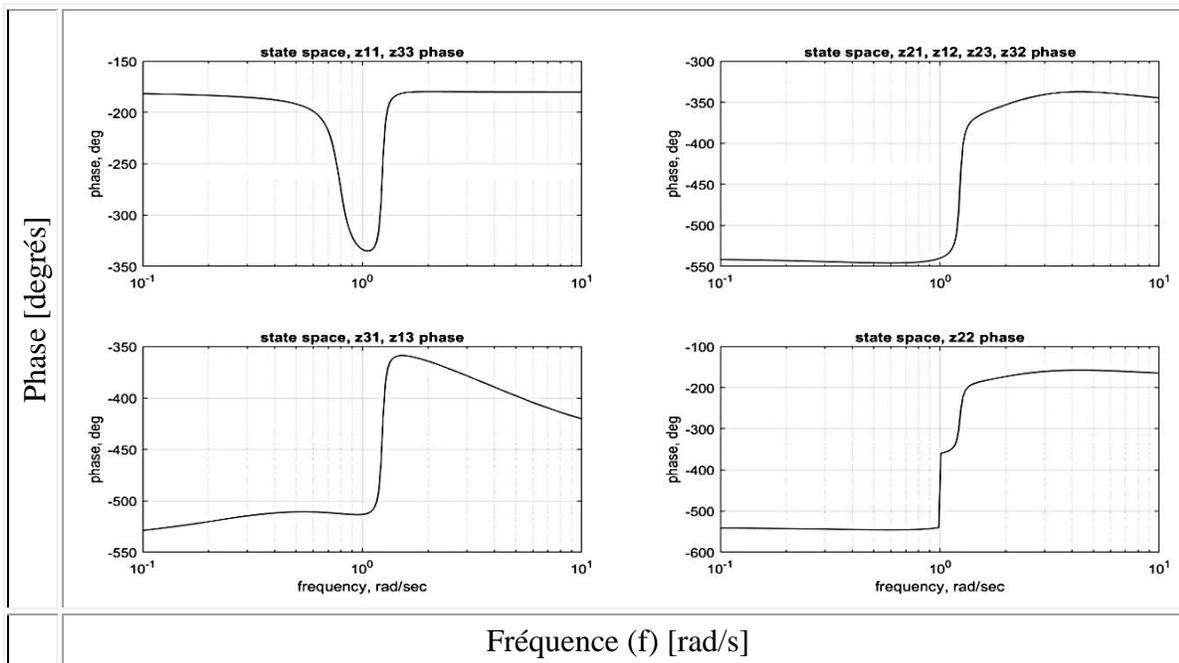
<sup>55</sup> Par analyse, concevoir une structure qui va survivre aux environnements dynamiques.

<sup>56</sup> Par test, valider les analyses et s'assurer que la structure est intacte.



Scripts MATLAB, 2018

Figure 6.3 : Spectres de réponses variantes fréquentielles / SRF

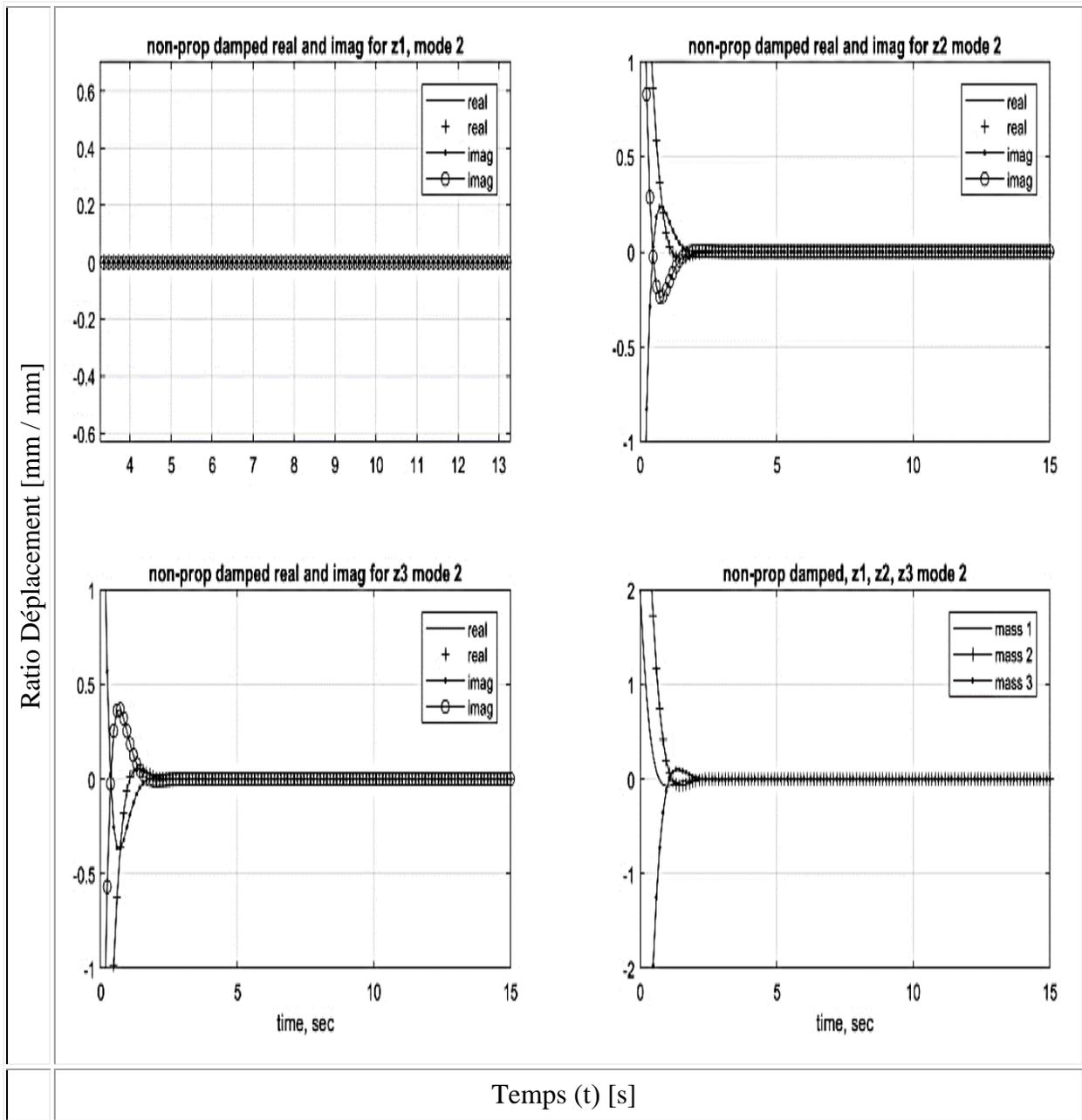


Scripts MATLAB, 2018

Figure 6.4 : Spectres de réponses variantes fréquentielles / SRF

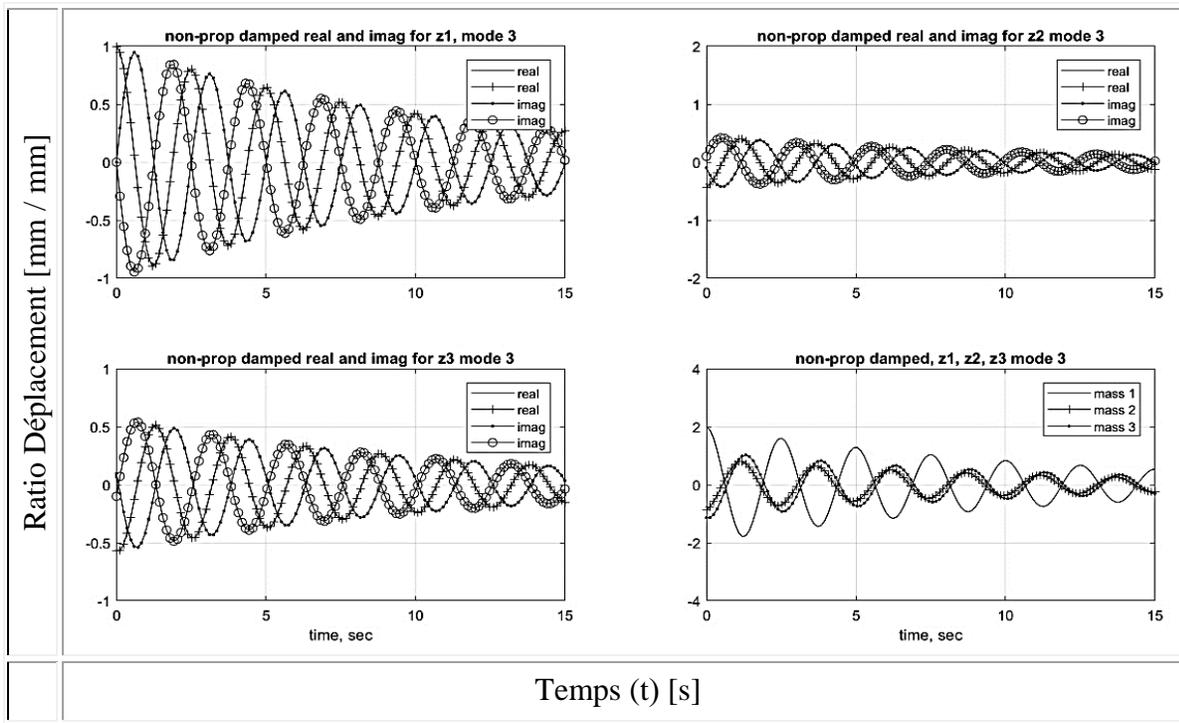
### 6.3.2 L'approche transitoire moderne

L'approche moderne est basée sur l'analyse des réponses temporelles ou transitoire du système (lorsque l'entrée est un échelon ou une impulsion). Et les Scripts MatLab ci-après (Figures 6.5 à 6.7) relatives à notre modèle illustrent les réponses temporelles au problème selon la méthode d'analyse modale de modélisation d'état.



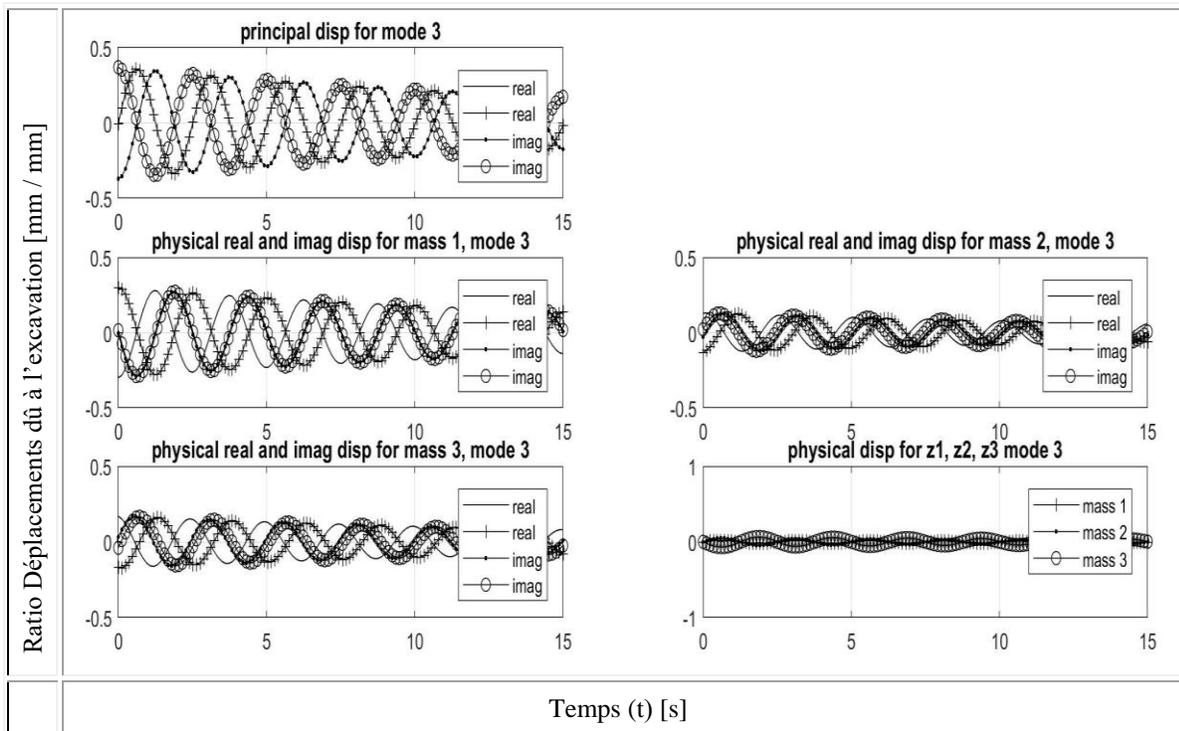
Scripts MATLAB, 2018

Figure 6.5 : Réponses variantes transitoires / Cas non-amorti ( $\zeta < 1$ ), mode 2)



Scripts MATLAB, 2018

Figure 6.6 : Réponses variantes transitoires / Cas non-amorti ( $\zeta < 1$ ), mode 3



Scripts MATLAB, 2018

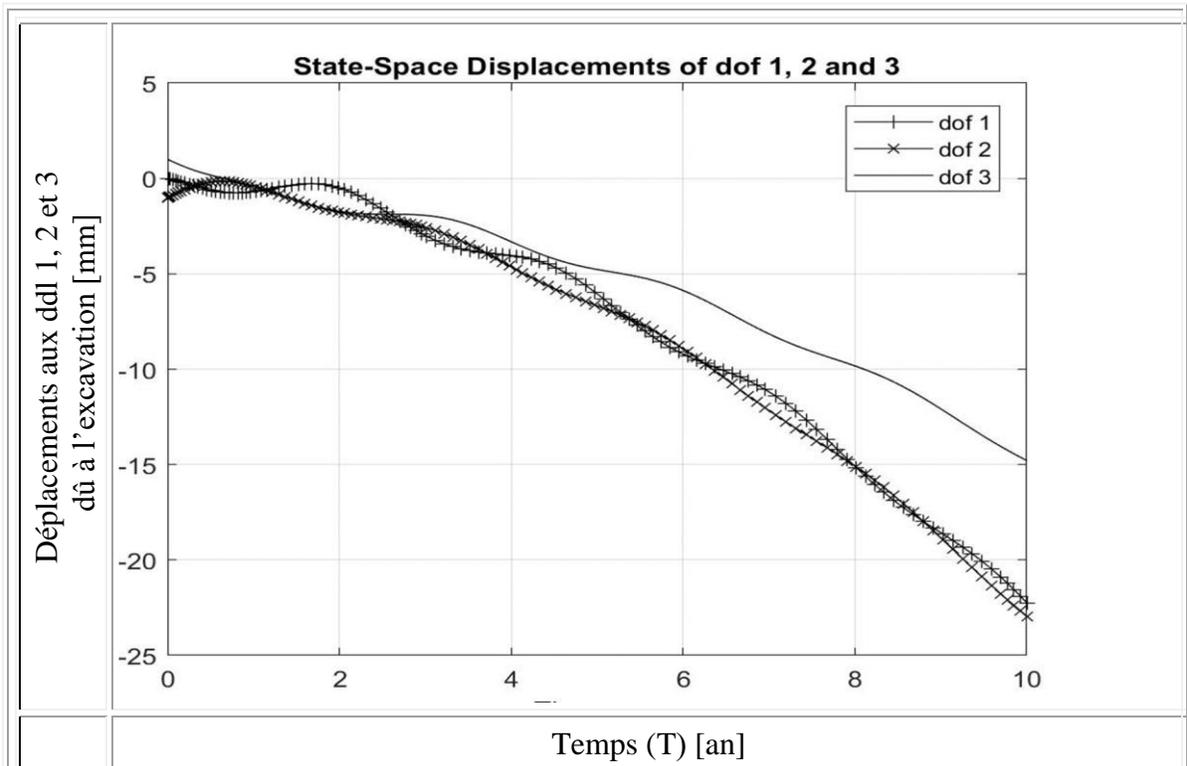
Figure 6.7 : Réponses variantes transitoires / Cas amorti ( $\zeta > 1$ ), mode 3

#### 6.4 Réponses indicielles adéquates

L'étape d'analyse modale expérimentale est nécessaire pour calculer l'amortissement de l'infrastructure puisqu'il n'existe pas de modèle analytique (faute de délai d'exécution, de moyens financiers surtout) pour en prédire sa valeur. Il y a plusieurs étapes avant d'obtenir la solution en coordonnées absolues  $\{X(t)\}$  :

- a) Obtenir valeurs et vecteurs propres.
- b) Calcul des matrices de masse et de rigidité modales
- c) Projection de l'équation du mouvement sur une base de vecteurs propres.
- d) Calcul des composantes modales : transformation linéaire (recherche des coordonnées modales  $\{q\}$ ).
- e) Calcul de la solution : Obtention du mouvement relatif ( $z$ ) et du mouvement absolu ( $x$ ).

Pour l'excitation par la base, voici l'allure de la réponse indicielle de déplacement absolu de l'infrastructure (Figure 6.8) à des degrés de liberté 1, 2 et 3.

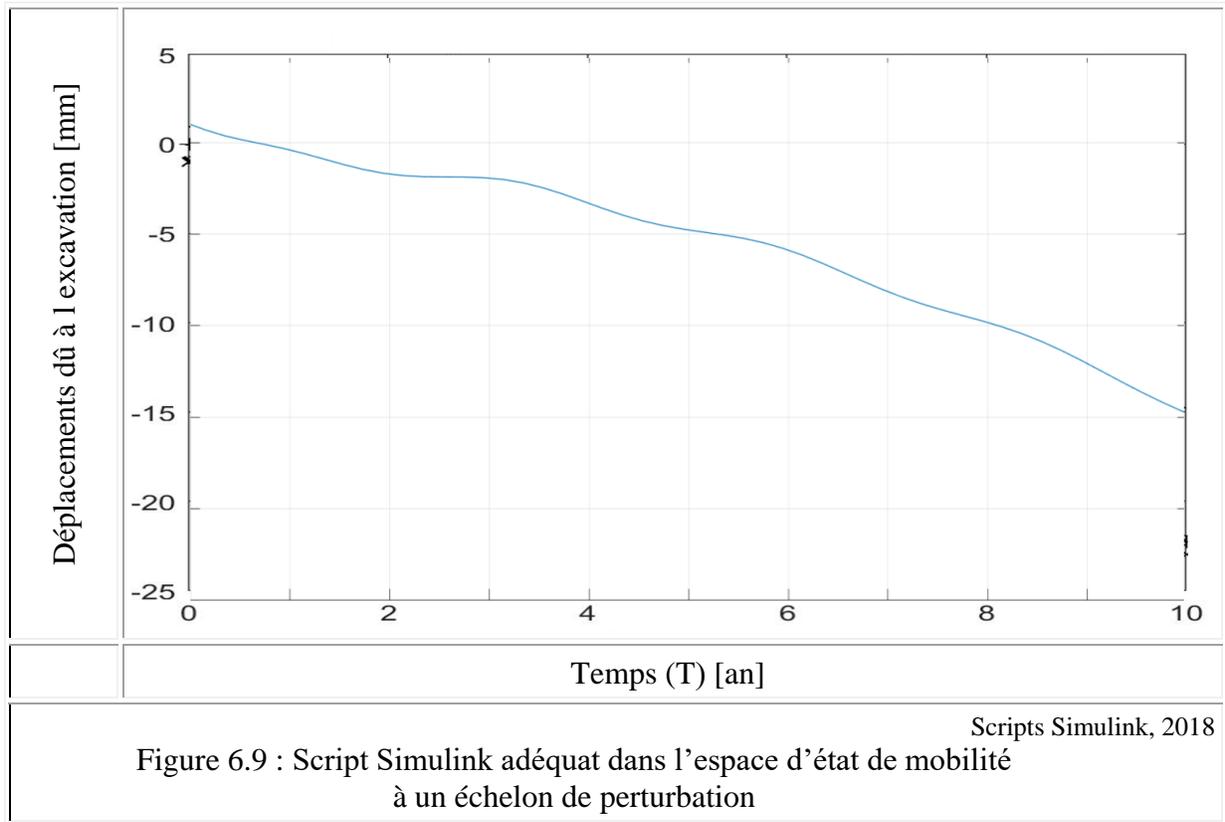


Scripts Matlab, 2018

Figure 6.8 : Réponse transitoire adéquate de l'état de mobilité

## 6.5 Validité des résultats

Dans l'analyse numérique, on choisit de confronter le modèle développé avec les résultats simulés avec Simulink (module graphique de Matlab) qui nous produit une solution-variante comparative acceptable pour un massif à comportement visqueux. (Figure 6.9). D'où la validité des résultats.



Donc, nous pouvons donc stipuler que le modèle de comportement proposé ainsi que la stratégie de calcul utilisée permet une prévision raisonnable de l'état des déformations différées de la galerie perturbée.

## 6.6 Conclusion

Les méthodologies analytiques susceptibles de mieux composer avec la complexité des phénomènes géophysiques donnent des systèmes d'équations fréquentielles, spatiales ou temporelles. Problème complexe. Des sources d'erreurs lors des transformations ne doivent pas être négligées. Pratiquement, le comportement à long terme dans le tunnelage a des limitations dans l'utilisation des paramètres de fluage .

De ce fait, il s'avère que, dans les projets souterrains, les déformations dépendant du temps peuvent se produire au cours du processus de construction ou sur une longue période de temps. Ce genre de comportement a lieu dans une combinaison particulière de roches massives des propriétés mécaniques et des contraintes *in situ* et peut se produire soit sous charge continue et contraintes constantes ou comme un processus de relaxation dans des conditions de tension fixe. Dans notre cas, le massif rocheux est encore résistant. La relaxation est positive.

La simulation d'un tel comportement dans la modélisation rhéologique et la sélection des paramètres de fluage dans une analyse viscoélastique ne sont pas négligeables. Les paramètres de fluage peuvent être trouvés dans cette étude et ils sont estimés soit à partir de laboratoire ou *in situ* des tests<sup>57</sup>. A cet effet, une analyse de sensibilité dans un environnement tunnel est présentée et différents paramètres sont sélectionnés afin de capturer l'effet de "*point de rupture*". Le même problème est simulé dans chaque analyse utilisant différents paramètres de fluage. S'appuyant sur les résultats, cette étude met en lumière les mécanismes des modèles visqueux et les conséquences qui peuvent découler de la sélection des différents paramètres en donnant nos directives applicables.

---

<sup>57</sup> Consulter l'Annexe G pour plus de détails sur les « Sensibilités des paramètres de fluage viscoélastiques ».

## QUATRIÈME PARTIE

### SIMULATION NUMÉRIQUE DU MODÈLE DE SEDREN

Cette quatrième partie de la thèse consiste à quantifier les différents facteurs contrôlant le développement des zones d'influence de la mine. Pour traiter les données, nous utilisons une simulation numérique à l'aide des codes EXAMINE<sub>2D</sub>, PLAXIS<sub>2D</sub>, FLAC<sub>2D</sub><sup>58</sup> aux fins d'obtenir des sorties (lieu des champs de contraintes critiques ou zone d'influence<sup>59</sup> de l'excavation, déplacements et/ou déformations) valides. Spécifiquement, la démarche de recherche se veut une méthode hybride : analytique, analogique et numérique. Elle privilégie une connaissance de la géologie, la géotechnique, la formulation de modèles de mécanique de solides déformables soumis aux ondulations et la résolution de problèmes d'éléments finis et de différences finies avec des conditions aux frontières.

La méthodologie de simuler un modèle avec les codes utilisés (FLAC<sub>2D</sub> et / ou PLAXIS<sub>2D</sub>) s'exécute ainsi :

- Faire des essais-erreurs pour caler surtout les paramètres du modèle.
- Valider le modèle avec des essais homogènes de fluage et de relaxation tirés de la littérature.
- Implanter le modèle dans le code de calcul éléments finis (PLAXIS) ou différences finies (FLAC).
- Proposer une stratégie de calcul en couplant l'axisymétrie au calcul de la déformation plane.
- Faire une analyse de sensibilité des paramètres recueillis et calés.
- Simuler et analyser les contraintes et les déformations en confrontant les résultats du modèle simulé avec des mesures prises en chantier des galeries Mémé-Casséus.
- Réaliser un certain nombre de calculs paramétriques permettant d'évaluer la valeur du facteur de confinement après soutènement.

---

<sup>58</sup> Voir Annexes H et I pour la familiarisation avec des codes de simulation d'éléments finis et de différences finies utilisés.

<sup>59</sup> Pourquoi doit-on connaître la zone d'influence de l'excavation ? Le champ de contraintes produit par une excavation percée à l'intérieur de la zone d'influence d'une autre excavation n'est pas la même que si elle était percée à l'extérieur; de plus, cette deuxième excavation peut perturber le champ de contraintes de la première de façon significative. La surveillance des ouvrages à l'aide d'élongamètres nécessite que le point d'ancrage extrême soit considéré fixe; il doit être au moins localisé à l'extérieur de la zone d'influence.

Le Figure 7.1 ci-après indique la stratégie opérationnelle.

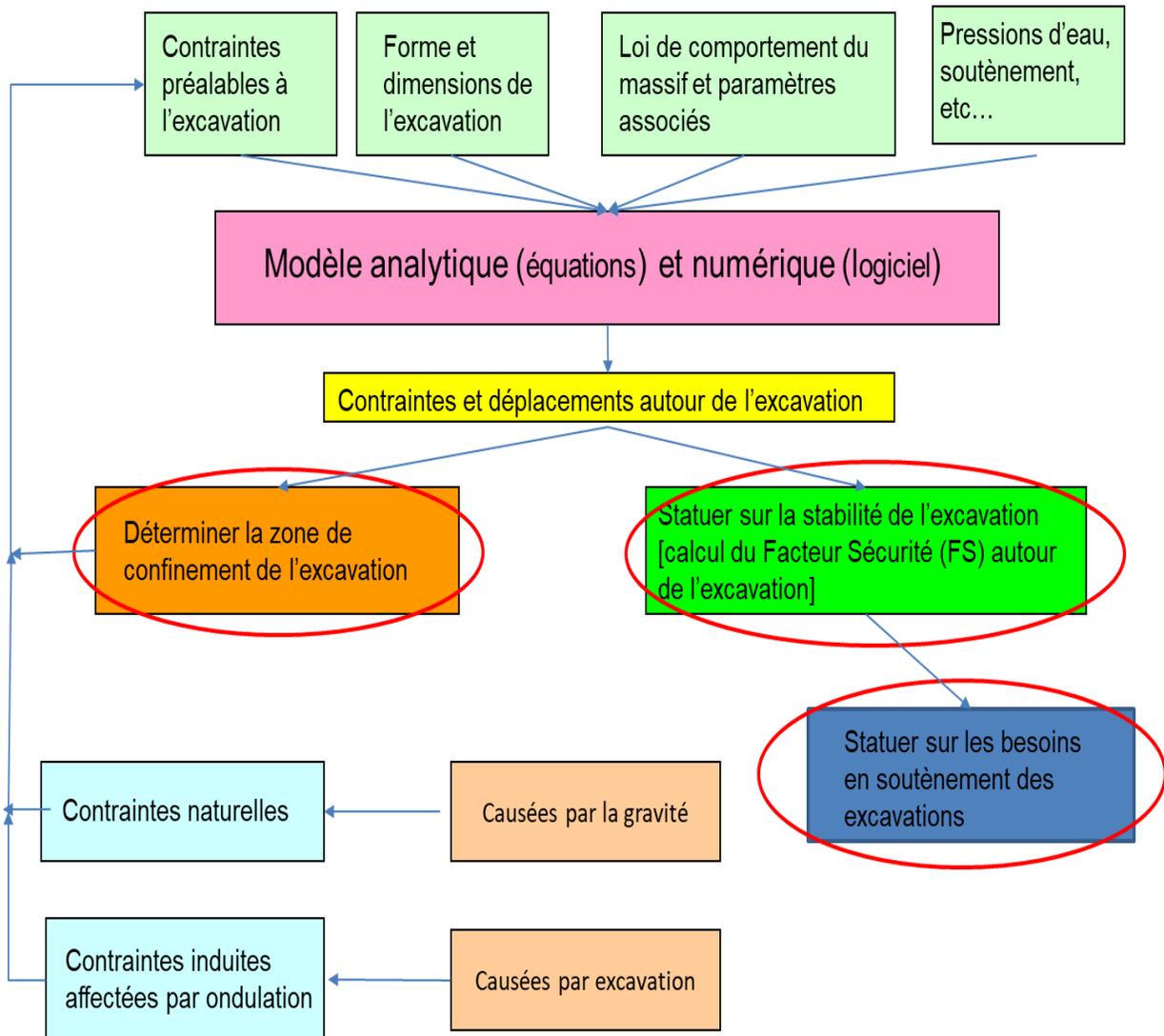


Figure 7.1 : Schéma logique et fonctionnel d'analyse de stabilité (Corthésy et al., 1997)

Bref, cette quatrième partie de la thèse (composée des Chapitres 7 et 8) se concentre sur l'application des outils de modélisation et d'analyse au cas d'étude des galeries de Mémé et de Casséus. Le Chapitre 7 propose des simulations numériques basées sur les codes de calculs en éléments finis (EXAMINE<sub>2D</sub>, PLAXIS<sub>2D</sub>) et de différences finies (FLAC<sub>2D</sub>). Les modèles rhéologiques retenus sont ainsi intégrés au sein des matrices de rigidité de ces différents codes pour les calculs entre maillages. Le Chapitre 8 apporte une analyse critique en lien avec l'étude de cas.

## CHAPITRE 7

### ÉTUDE DE CAS : LA MINE SEDREN

« La connaissance des contraintes naturelles qui prévalent dans les massifs rocheux est un prérequis indispensable pour la conception sécuritaire et économique des excavations dans les massifs rocheux... » (Corthésy, R., Leite, M. H., et Gill, D. E., 1997).

Tableau 7.1 : Données utilisées pour l'élaboration du modèle proposé de Sedren

Mine	X [m]	$\sigma_1$ [m]	Azimut [m]	Plongée [m]	$\sigma_2$ [m]	Azimut [m]	Plongée [m]	$\sigma_3$ [m]	Azimut [m]	Plongée [m]	$\sigma_v$ [m]
Casséus	70	4.7	207	10	1.4	302	24	1.3	95	64	1.3
Casséus	70	8.1	32	1	3.5	302	11	2.7	122	79	2.7
Casséus	70	7.9	195	3	4.4	105	3	2.6	325	85	2.6
Mémé	200	14.3	34	6	7.0	303	12	4.8	152	76	5.0
Mémé	200	19.1	35	0	14.4	125	11	7.2	303	79	7.4
Mémé	200	16.7	45	0	10.8	135	0	6	135	90	6.2

Le Tableau 7.1 dresse les données utilisées à partir desquelles le modèle proposé va être élaboré. Elles proviennent de deux mines (Mémé et Casséus). Les profondeurs (x) couvertes vont de 70 m et 200 m. La sélection de ces données utilisées pour le modèle se fait en fonction d'un critère de contrôle de qualité particulier.

#### 7.1 Étude du chargement des galeries de l'infrastructure

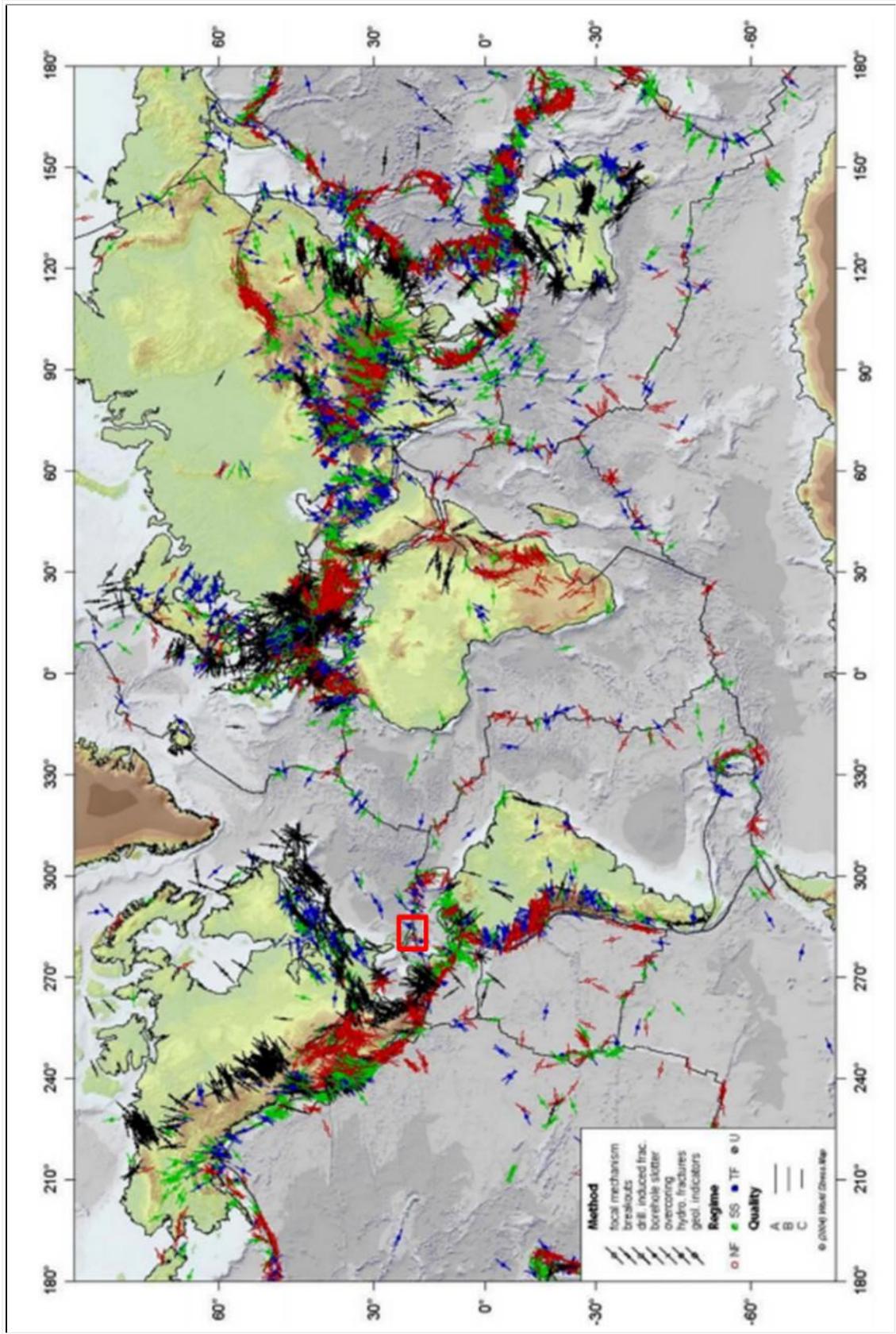


Figure 7.2 : Identification des contraintes induites in situ sur la carte mondiale des contraintes. Voir l'encadré en rouge pour la localisation de l'île Hispaniola (Haïti et la République dominicaine). Source : world-stress-map.org, 2015.

Les rapports techniques reliés à la localisation et la chronologie des campagnes de mesures sont joints à l'Annexe D de la thèse. Les résultats obtenus (contraintes évaluées) de ces campagnes de mesures font l'objet de validation à partir de la carte mondiale des contraintes induites in situ donnant les orientations des contraintes de compression horizontales maximales de la Figure 7.2. Une comparaison avec un modèle de prédiction des contraintes identifiées à l'île Hispaniola (Haïti + Dominique) sur la carte mondiale des contraintes induites in situ donnant les orientations des contraintes de compression horizontales maximales démontre que le modèle choisi est plus sécuritaire autant pour les instabilités de type structurale que pour les instabilités par excès de contraintes.

Le cas d'un anneau circulaire <sup>60</sup> est uniforme. Cependant, le cas des tunnels de Sedren en D (Adapté de JSCE, 2006) est spécifique puisque des joints (nœuds) critiques existent entre la voûte et les parements dont on ne pourrait les négliger dans une étude.

Étape 1 : Estimation de la rigidité du ressort des sections du tunnel

Voilà des détails sur l'interaction du massif rocheux / support selon le critère du ressort de Winkler.

Où :

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)} = 20\,000 \text{ MPa (rigidité du ressort)} \quad (7.1)$$

$$K_r = \frac{E_r b \theta}{(1+\nu_r)} \text{ (rigidité radiale du ressort)} \quad (7.2)$$

$$K_t = \frac{0.5 K_r}{(1+\nu_r)} \text{ (rigidité tangentielle du ressort)} \quad (7.3)$$

b : longueur du tunnel

$\theta$  : angle formé par l'orientation entre les ressorts

---

<sup>60</sup> Voir Annexe F pour détails sur l'Analyse des anneaux des tunnels sous des contraintes induites.

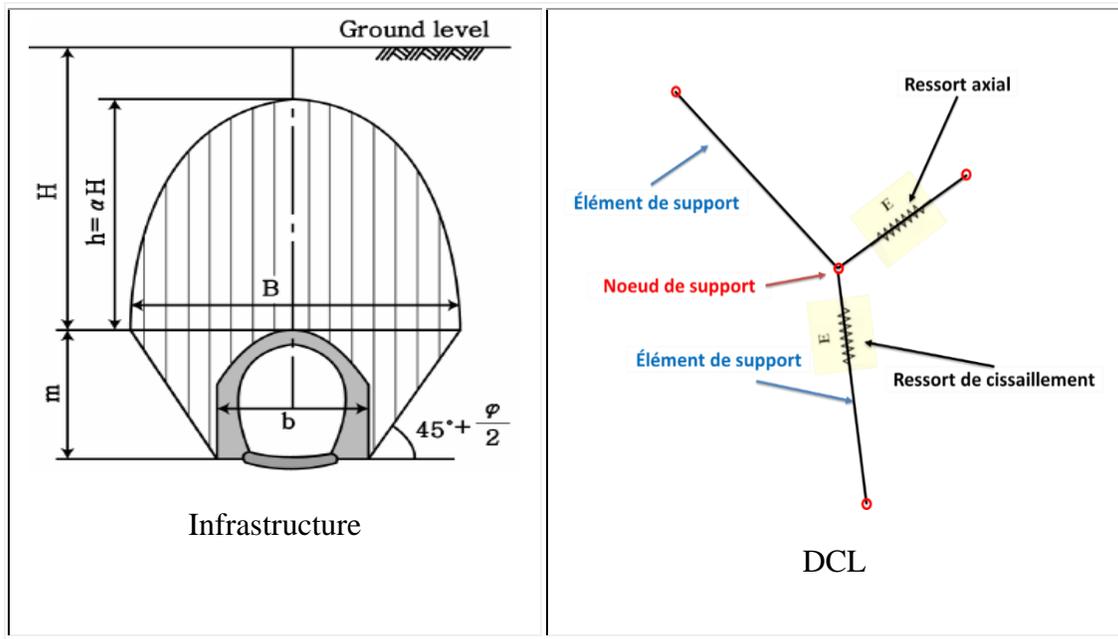


Figure 7.3 : Diagramme de corps libre (DCL) des contraintes agissant au nœud reliant voûte et parement (Adapté de Li et Low, 2010)

Analysant le nœud de la Figure 7.3, nous pouvons calculer les rigidités ( $K_i$ ) des sections du tunnel en béton se trouvant dans le Tableau 7.2.

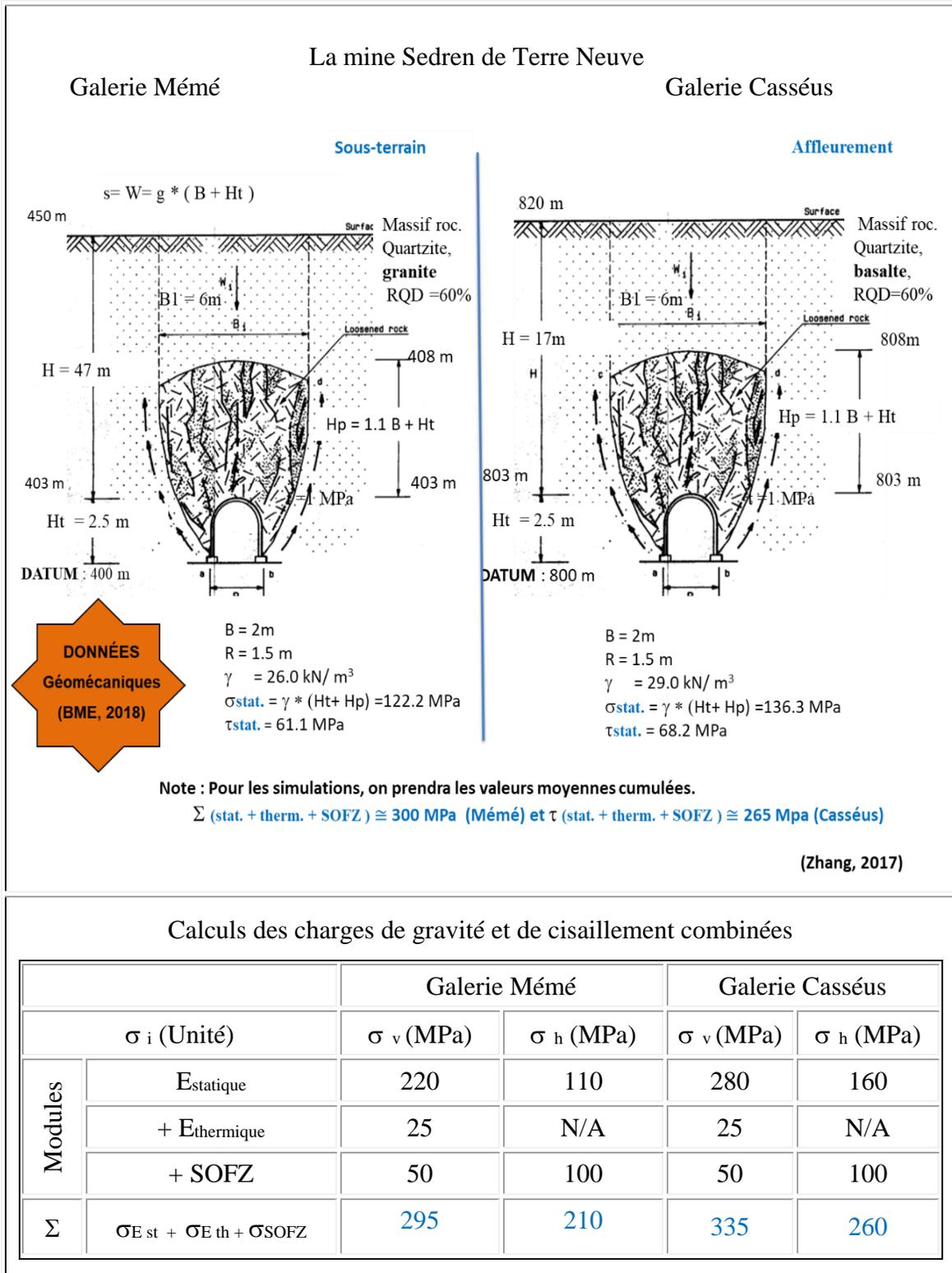
Tableau 7.2 : Rigidité ( $K_i$ ) des sections du tunnel

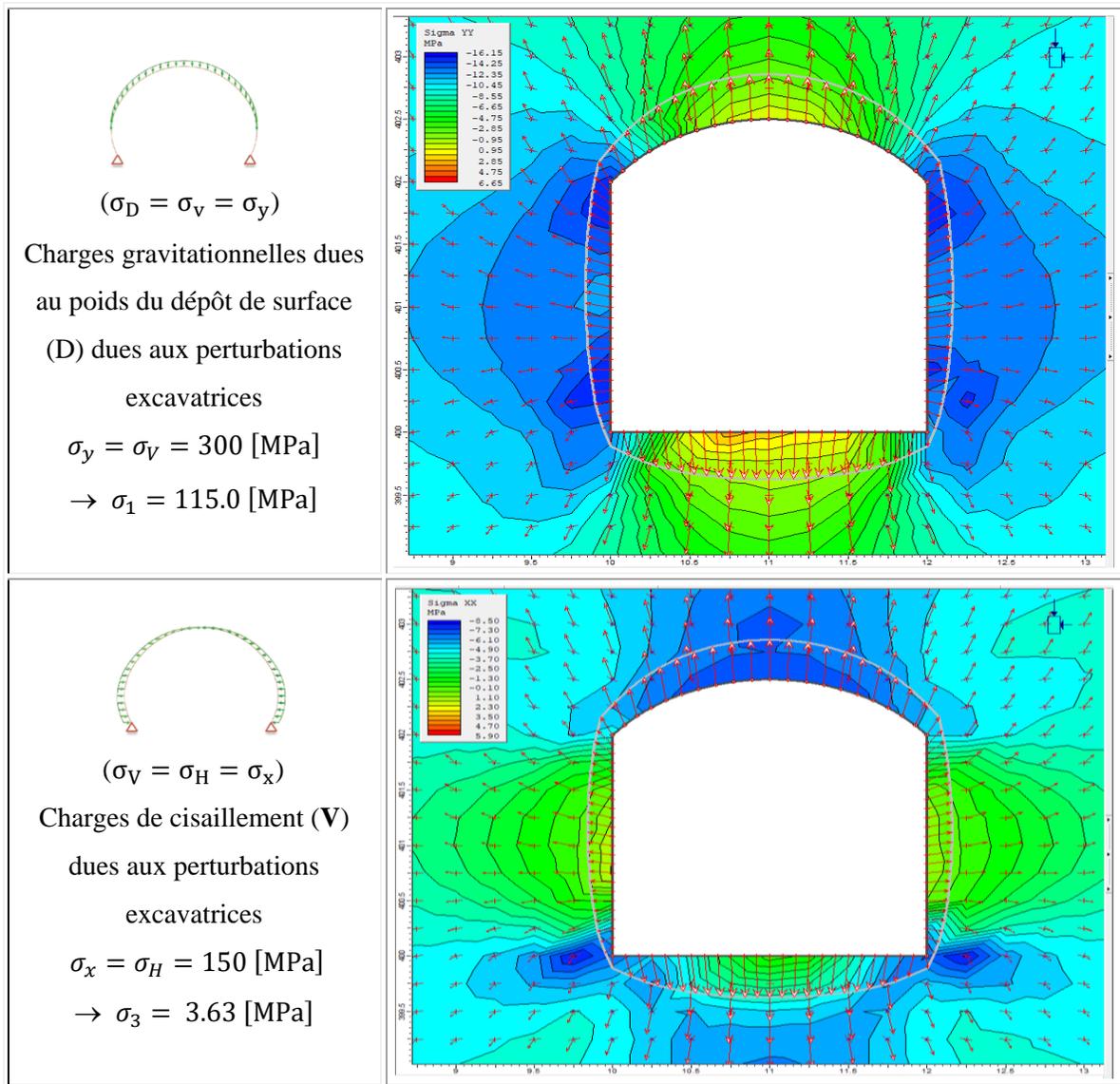
ID		Galeries Mémé – Casséus	
		$K_r$ [MPa]	$K_{th}$ [MPa]
<i>Modules</i>	$E_{stat.}$	5026.0	2011.0
	$E_{th.}$	2094.0	838.0
	$E_{SOZF}$	1131.0	452.0
$K_t = \Sigma = K_{E_{stat.}} + K_{E_{th.}} + K_{E_{SOZF}}$		8 251	3 301.0

a) Évaluation des charges pressiométriques de gravité et de cisaillement

Néanmoins, Zhang (2017) adopte l'approche de Terzaghi et développe une formule d'estimation de la charge existante. Voir calculs types : Tableau 7.3 et Figure 7.4.

Tableau 7.3 : Évaluation des charges pressiométriques de gravité et de cisaillement





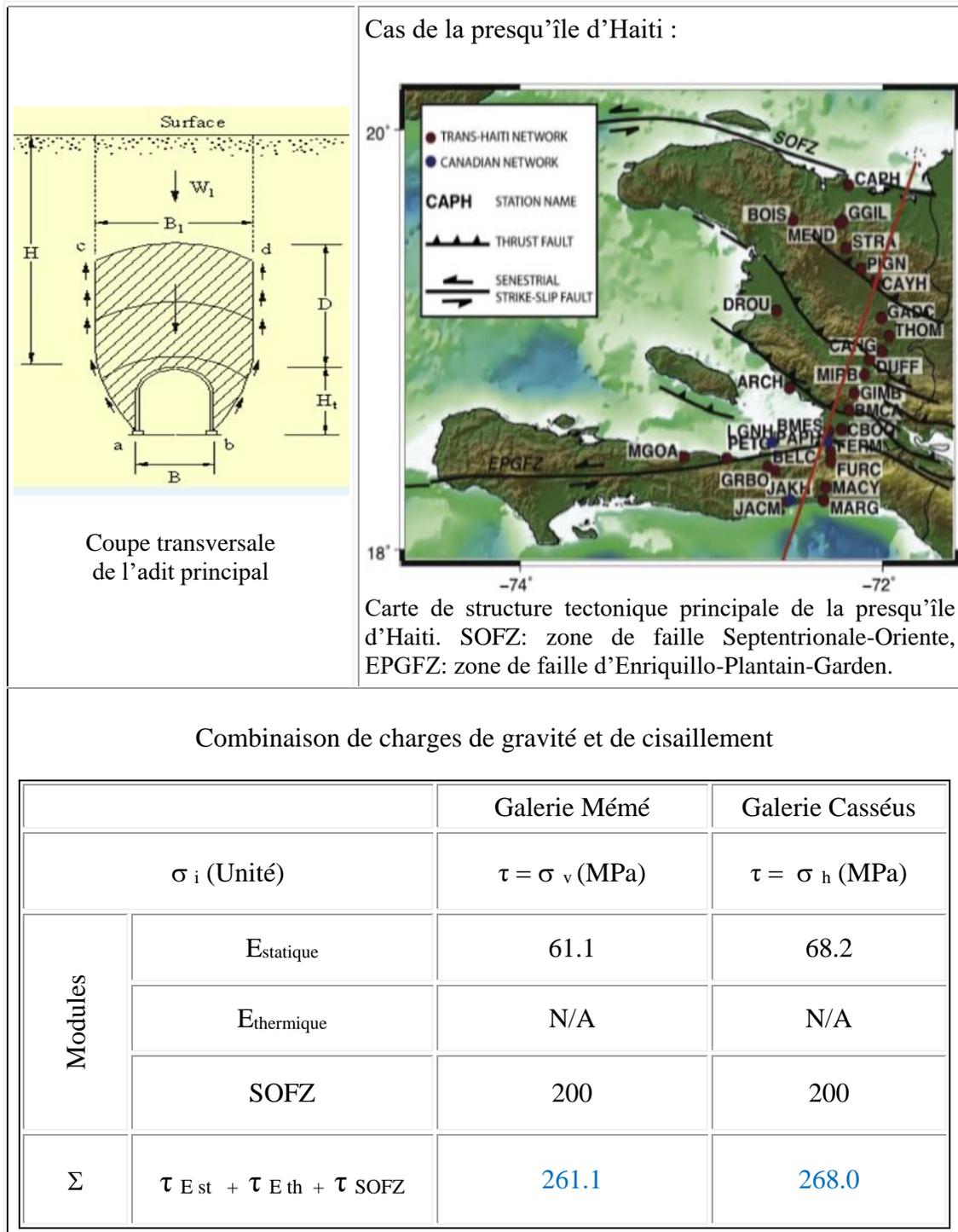
Script Examine 2D, 2018

Figure 7.4 : Diagrammes de contraintes normales ( $\sigma_{yy}$ ) et ( $\sigma_{xx}$ ) du tunnel selon les spécifications standards (JSCE, 2006)

b) Évaluation des charges vives de schistosité dues aux perturbations sismiques (Q)

Comme les forces tectoniques sont l'une des principales source de contraintes naturelles en Haïti et qu'il n'existe pas encore de loi permettant de les quantifier, la seule façon fiable de les connaître demeure la mesure directe de ces dernières avec des techniques plus ou moins sophistiquées. Le calcul des charges vives de schistosité dues aux perturbations sismiques (Q) se fait sur la base de contraintes admissibles. Le Tableau 7.4 dresse les résultats de calculs des charges de sismicité et la Figure 7.5 schématise les contraintes de cisaillement.

Tableau 7.4 : Évaluation des charges de sismicité



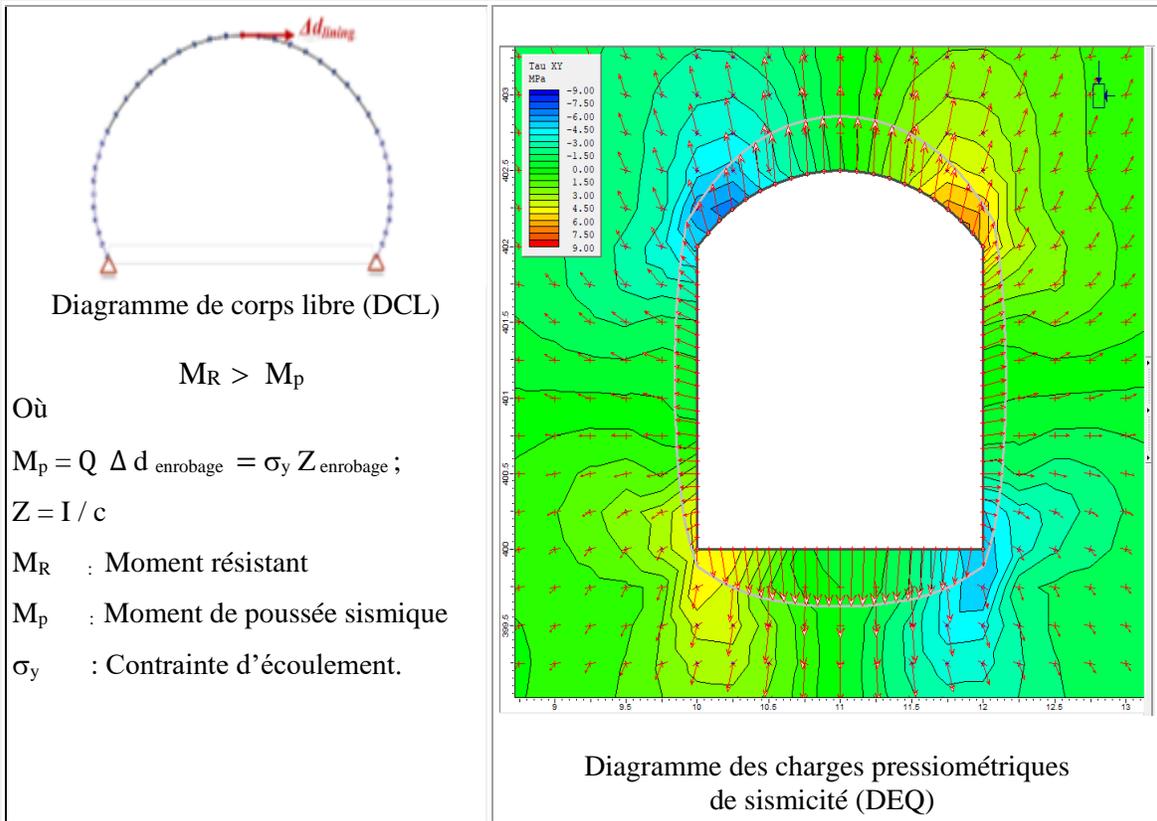


Table des déplacements induits par la charge vive de sismicité (Galeries Mémé - Casséus)

ID	Scénario optimiste	Scénario pessimiste	
$\delta_i$ (Unité)	$\delta_{\text{optimiste}}$ ( $\mu\text{m}$ )	$\delta_{\text{pessimiste}}$ ( $\mu\text{m}$ )	
Modules	$E_{\text{st}}$	9.3	17.4
	$E_{\text{th}}$	14.4	26.8
	SOFZ	12.0	22.4
$\Sigma$	$\delta_{E_{\text{st}}} + \delta_{E_{\text{th}}} + \delta_{\text{SOFZ}}$	35.7	66.6

Note : Voir Annexe B pour des détails.

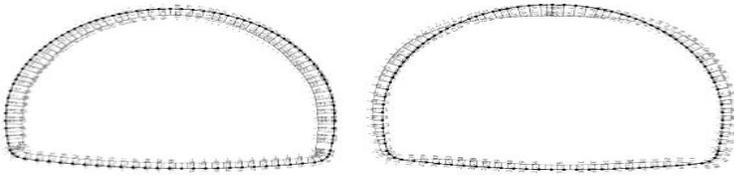
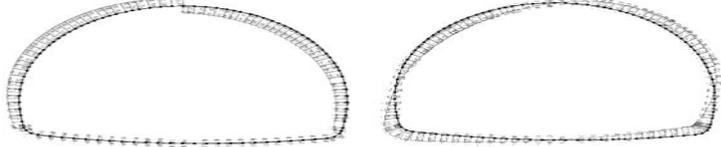
Script Examine 2D, 2018

Figure 7.5 : Diagrammes de contraintes de cisaillement ( $\tau_{xy}$ ) du tunnel selon les spécifications standards (JSCE, 2006)

a) Évaluation des charges combinées pondérées ( $U_f$ )

Le Tableau 7.5 dresse les diagrammes d'efforts axiaux (DEA)<sup>61</sup> et de moments fléchissants (DMF)<sup>62</sup> de l'enrobage des tunnels selon les spécifications standards de JSCE.

Tableau 7.5 : Diagrammes d'efforts axiaux (DEA) et de moments fléchissants (DMF) des tunnels

Coupe E <sup>st</sup> du modèle à court terme élastique	 <p>a) DEA b) DMF du Tunnel sous charge statique</p>
Coupe E <sup>thermique</sup> à moyen terme élasto-plastique	 <p>c) DEA d) DMF du tunnel sous charges statique + thermique</p>
Coupe litho SOFZ à moyen terme viscoplastique	 <p>e) DEA f) DMF du tunnel sous charges statique + sismique</p>
Coupe litho SOFZ à long terme élasto-viscoplastique	 <p>g) DEA h) DMF du Tunnel sous charges statique + thermique + sismique</p>

Script Code Safi, 2018

<sup>61</sup> Charges combinées = Poids mort + Perturbations =  $D + (\text{Excavations} + \text{Séisme})$

$$U_f = D_f + P_f = D_f + (V_f + Q_f) = \alpha D + \Psi(V + Q) = 1.05 D + 1.3 (V + Q)$$

où  $\alpha = 1.05$  ;  $\Psi = 1.3$  (coefficients de pondération).

<sup>62</sup> Moments combinés =  $M^{\text{Dépot de surface}} + M^{\text{Perturbations}} = M^D + M^{(\text{Excavations} + \text{Séisme})}$

$$M_f = M_f^{(D)} + M_f^{(P)} = M_f^{(D)} + M_f^{(V+Q)} = \alpha M^{(D)} + \Psi(M^{(V)} + M^{(Q)}) = 1.05 M^{(D)} + 1.3 M^{(V+Q)}$$

## 7.2 Vérification de la structure du modèle

Structuralement, le massif de Terre Neuve paraît relativement simple. Un anticlinal principal, convexe vers le Nord, forme l'épine dorsale de la presqu'île. Les lignes structurales du massif de Terre Neuve présentent une direction N40°W - S40°E avec une légère courbure, convexe vers le SW.

Tableau 7.6 : Spécifications standards des paramètres géomécaniques  
(SIMECSOL, 1996)

ESSAIS	NORMES USUELLES	PROPRIÉTÉS	COMMENTAIRES
Traction diamétrale [MPa]	ASTM D3967-86	$T_0, T_f$	$T_f$ (à long terme)
Traction uni – axiale	ASTM D2936-84	$T_0 = 1.906, T_f$	$T_f$ (à long terme)
Compression uni-axiale (sans mesures des μdéformations)	ASTM D7072-07	$C_0 = P_0 = \gamma h, C_f$	$C_f$ (à long terme)
Compression uni – axiale (avec mesures des μdéformations)	ASTM D7072-07	$C_0, E_0, \nu_0$	$C_f = 0.75 * C_0$ $E_0/2.0 < E_f < E_0/1.5$ $1.5 \nu_0 < \nu_f < 0.75\nu_0$
Compression tri – axiale [MPa]	ASTM D7072-07	Courbe enveloppe de rupture	
Cisaillement direct sur le plan structural	ASTM D5607-95	$\phi_0 = 62.90^\circ$ $c = 7.328$ [MPa]	$\phi_f$ (à long terme)
Dureté Shore Dureté Schmidt (scléromètre) Dureté double poinçonnement	SIMR ASTM D5673-05 ASTM D5731-07	$S_b = [35, 68]$ $S_g = [45, 56]$	$I_s = P / D^2 = 55$ coups
Vélocité ultrasonique	N / A	$V_p, V_s, E_0, \nu_0$	

Pour déterminer quelques propriétés du massif de Terre Neuve à différentes sections du tunnel, nous avons utilisé les spécifications standards d'essais de laboratoire qui sont listés au Tableau 7.6.

Tableau 7.7 : Évaluation de la pression de soutènement selon Terzaghi (1979)

Récapitulatif des données introduites	
— données relatives au massif —	
Condition de la roche	dure et intacte
⑫ Poids du sol $\gamma_d$ (kN/m <sup>3</sup> )	26
Angle de frottement $\phi$ (°)	57.45
— données relatives à l'excavation —	
Hauteur du tunnel Ht (m)	2.5
Largeur du tunnel B (m)	2
Profondeur de l'excavation	250
Résultats de calculs obtenus	
— Classification de Terzaghi (1946) —	
Pression de soutènement :	de 0 à 0.013 MPa
Remarque sur le soutènement :	Quelques ancrages s'il y a chute de pierres
— Solution analytique Terzaghi (1943) —	
Pression de soutènement :	0.045 MPa

(Script Didactu, 2019)

Dans le cadre de l'étude de la mise en sécurité des fronts de taille de la mine Sedren, trois sondages d'environ 100 m de profondeur ont été réalisés à quelques mètres du sommet des fronts de taille dont la hauteur peut atteindre 95 m. Les caractéristiques au cisaillement de différentes couches de granodiorite exploitées ont été estimées à partir d'essais à la boîte de Casagrande et par rétro-analyse des incidents observés sur les fronts. Deux types de massifs rocheux ont été caractérisés :

- assez déconsolidés et peu résistants;
- très résistants.

Une simulation d'étude de confinement de la galerie souterraine en béton a été réalisée. Le tunnel est soumis à des contraintes effectives selon le critère de rupture de Mohr-Coulomb modifié (Hoek-Brown). Voir le Script Didactu Tableau 8.7 pour les résultats de l'évaluation de la pression de soutènement (selon Terzaghi, 1946).

Un ensemble de carottes choisies parmi les plus dures et issues de ces différentes campagnes de sondages a été soumis à des essais de dureté. Ces essais ont révélé des valeurs moyennes de dureté comprises entre 2,5 et 4, correspondant à la classe de dureté des roches dures pour la mine Sedren. Des essais de cisaillement ont été également réalisés sur les parties indurées du basalte, du granodiorite et du quartz exploité dans la mine Sedren. Dans l'étude géotechnique, les caractéristiques de cisaillement en contraintes effectives retenues sont les suivantes : cohésion effective de 2.435 MPa et angle de frottement effectif de  $62.90^{\circ}$ . Des essais pressiométriques, pour caractériser le granodiorite et le basalte situés sur la tranche altérée de surface, ont indiqué, sur une profondeur de 2 à 3 m, des pressions limites allant de 0.004 à 2 MPa pour l'un et de 1 à 1,5 MPa pour l'autre. Au-delà de ces horizons altérés, les pressions limites varient de 3 MPa à plus de 5 MPa, valeurs correspondant à un sable très compact. Les valeurs obtenues pour le module pressiométrique sont supérieures ou égales à 30 MPa. Toutes ces valeurs indiquent bien que ce granodiorite est sensible aux phénomènes d'érosion de surface. Ce qui est tout à fait logique au constat de la porosité et de la perméabilité élevées comparables à celles du granite. On notera également qu'une légère pression de confinement suffit à augmenter très significativement le module d'élasticité et le seuil de plastification du matériau.

Tableau 7.8: Caractérisation du massif rocheux

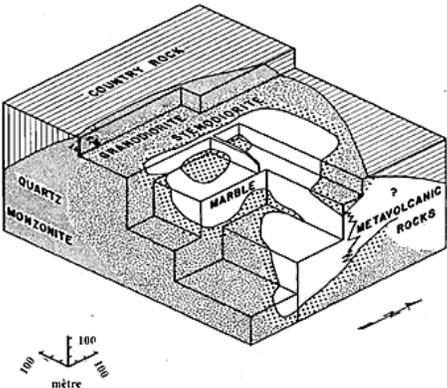
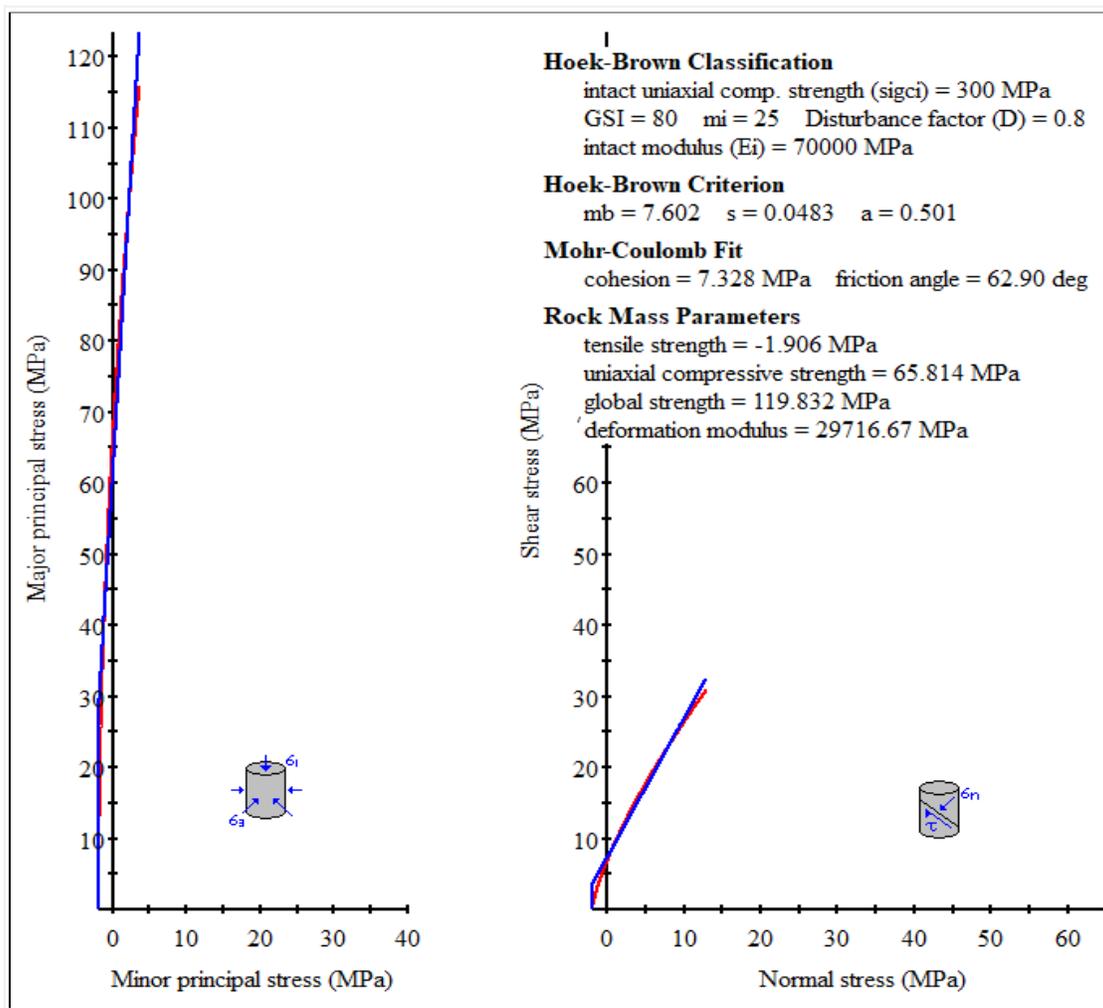
DESCRIPTION	SYMBOLE	RÉF. / FORMULE	Adit MÉMÉ	Adit CASSÉUS
Forme du tunnel	Fer-à-cheval	---	<i>Souterrain</i>	<i>Affleuré</i>
 <p>Vue axonométrique de la mine illustrant la concentration d'auro-cuprifère sous du marbre (Kesler, 1966).</p>	Cf. Tableau 2.2	Cf. Section 2.3.3 : Les gisements de Mémé et Casséus du massif de Terre Neuve pour des détails & Cf. Annexe E : Classification du massif rocheux pour des détails.	<b>Quartzite</b> + Porphyres + Marbre + Granodiorite et Basalte de qualité bonne.	<b>Quartzite</b> + Porphyres + Marbre + Granodiorite et Basalte de qualité bonne.
Rayon de la voûte de l'adit	R	Cf. Mesure in situ	1.5	1.5
Contrainte uniaxiale de compression de la roche intacte [MPa]	$\sigma_{c_i} = \sigma_v$	Cf. Tableau 1.3	295	310
Contrainte uniaxiale de cisaillement de la roche intacte [MPa]	$\sigma_c = \sigma_z$	$\tau = \sigma_h = K_0 \sigma_v = 0.5 \sigma_v$	65.814	65.814
Module d'élasticité du massif rocheux [MPa]	$E_e = \sigma/\epsilon$ $E_e = M_R \sigma_{c_i}$	Cf. Pente courbe expériment. $\sigma$ vs $\epsilon$	70 000	70 000
Module de déformation du massif rocheux [MPa]	$G_e$	$\frac{E}{2(1 + \nu)}$	29 717	29 717
Ratio Poisson du massif rocheux	$\nu$	$\nu = - \epsilon_v / \epsilon_h = - \sigma_v / \sigma_h$	0.21	0.21
Masse volumique massif rocheux [MN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma$	Cf. Propriétés	0.026	0.029
Contraintes de déconfinement in situ pour un essai triaxial [MPa]	p	$p = (\sigma_1 + \sigma_3) / 2$	p = 0.32	p = 0.32
Paramètre de cohésion [MPa]	C	essai triaxial	7.328	7.328
Paramètre qui limite l'angle de friction	$\phi_c$	essai triaxial	62.90 <sup>0</sup>	62.90 <sup>0</sup>
Paramètre qui limite la zone de dilatance	D	Cf. : Tableau 8.9	0.8	0.8
Constantes du massif rocheux original	$m_i$	Cf.: Donnée calée	25	25
	A	Cf. : Donnée calée	0.501	0.501
Constantes du massif rocheux fracturé	$m_b$	Cf.: Réponse obtenue	7.602	7.602
	$s_b$	Cf.: Réponse obtenue	0.0483	0.0483

Tableau 7.9 : Guide pour l'estimation du facteur d'endommagement D <sup>63</sup>  
(Hoeck-Brown., 2002)

Apparence d'un massif rocheux	Description d'un massif rocheux	Valeur D suggérée
	L'excavation contrôlée par un tunnelier (TBM) entraîne une perturbation minimale des massifs rocheux confinés entourant un tunnel de manière durable.	D = 0.0
	L'excavation mécanique ou manuelle dans des massifs rocheux de mauvaise qualité (pas de dynamitage) entraîne une perturbation minimale de la massif rocheux environnant.	D = 0.0
	Lorsque les problèmes de compression entraînent un soulèvement important du sol, la perturbation peut être grave à moins d'un renversement temporaire, comme indiqué sur la photo.	D = 0.5 Pas d'inversion.
	Un dynamitage de très mauvaise qualité dans un tunnel de roche dure entraîne de graves dommages locaux, s'étendant sur 2 ou 3 m, dans la masse rocheuse environnante.	<b>D = 0.8</b>
	Le dynamitage à petite échelle dans les pentes de génie civil entraîne des dommages modestes à la masse rocheuse, une particularité si le dynamitage contrôlé est utilisé, comme indiqué sur le côté gauche de la photo. Cependant, le relâchement de la contrainte entraîne certaines perturbations.	D = 0.7 Dynamitage causant peu de dommages.
		D = 1.0 Dynamitage causant beaucoup de dommages.
	Les très grandes pentes des mines à ciel ouvert subissent des perturbations importantes en raison du dynamitage de production intense et également en raison du soulagement des contraintes liées à l'élimination des morts-terrains. Dans certaines roches plus tendres, l'excavation peut être effectuée par arrachement et assouplissement et le degré de dommage aux pentes est moindre.	D = 0.7 Excavation mécanique.
		D = 1.0 Sablage de production.

<sup>63</sup> Dans le cadre de notre étude, la valeur de D = 0.8 va être considérée à cause de la mauvaise qualité de l'état des galeries Mémé-Casséus de Sedren qui ont de sévères dommages étendues jusqu'à 2 ou 3 m.

Les tableaux 7.8 et 7.9 dressent la liste des propriétés géomécaniques du massif rocheux illustré reliés à la recherche. Et les Scripts RocLab ci-après (Figure 8.6) analyse la résistance du massif rocheux des galeries Mémé – Casséus des contraintes. Voir Annexe E pour les calculs-types. Il est à noter : les caractéristiques du massif rocheux sont, en général, bien meilleures lorsque le massif n'est pas altéré selon Homand (1985). D'où les valeurs suivantes :  $G_0 = 29\,717$  MPa ;  $\sigma_c$  (résistance à la compression) = 65.814 MPa;  $\sigma_t$  (résistance à la traction) = -1.906 MPa et  $\sigma_u$  (résistance ultime) = 119.832 MPa.



Script RocLab

Figure 7.6 : Analyse de la résistance du massif rocheux des galeries Mémé – Casséus. Courbe en rouge / Hoek-Brown et Droite en bleu / Mohr-Coulomb modifié (Scripts RocLab 2019)

Des régressions polynomiales de degré 2 se sont avérées efficaces pour représenter la diminution de gradient de contraintes observées avec la profondeur. Les orientations des contraintes principales majeures et intermédiaires sont respectivement NE-SW pour  $\sigma_1$  et NW-SE pour  $\sigma_2$ . Ces contraintes sont dans un plan relativement horizontal. La contrainte principale mineure quant à elle est à peu près confondue avec la contrainte verticale. Voir Tableau 7.10.

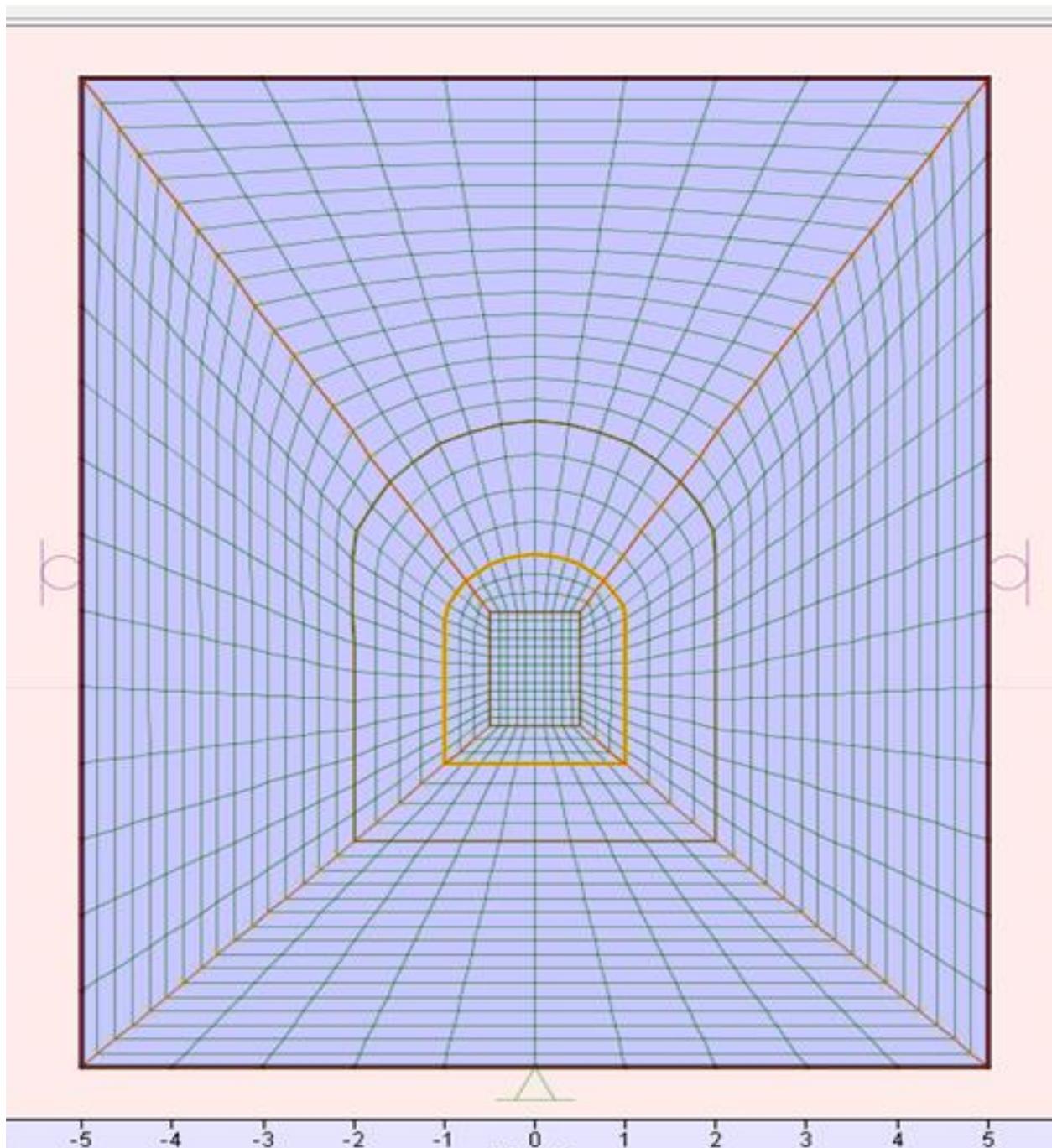
Tableau 7.10 : Modèle de prédiction choisi d'évaluation des contraintes dans le secteur de Terre Neuve (Adapté de Corthésy et al., 1997)

Contraintes [MPa]	Ordonnée à l'origine [MPa]	Gradient [MPa / m]	Coefficient de corrélation ( $R^2$ )
$\sigma_1$	12.0 ± 8.00	0.0366 ± 8.00	0.91
$\sigma_2$	6.1 ± 7.30	0.0253 ± 7.30	0.86
$\sigma_3$	1.2 ± 4.50	0.0190 ± 4.50	0.82
$\sigma_v$	0.6 ± 3.85	0.0253 ± 3.85	0.86

### 7.3 Méthodologie de simulation du modèle proposé

Dans cette thèse, pour traiter les données recueillies, nous proposons le développement d'un modèle de comportement visqueux basé sur le concept du modèle hiérarchisé CVISC avec une surface limite capable de décrire le comportement visqueux des massifs rocheux et utile au design de renforcement des galeries.

Les données seront simulées numériquement à l'aide des codes PLAXIS et FLAC aux fins d'obtenir des résultats (déplacements, déformations, zone d'influence etc.) du modèle. Un maillage bi-directionnel est créé pour esquisser le comportement de l'ouvrage. Voir Figure 7.7.



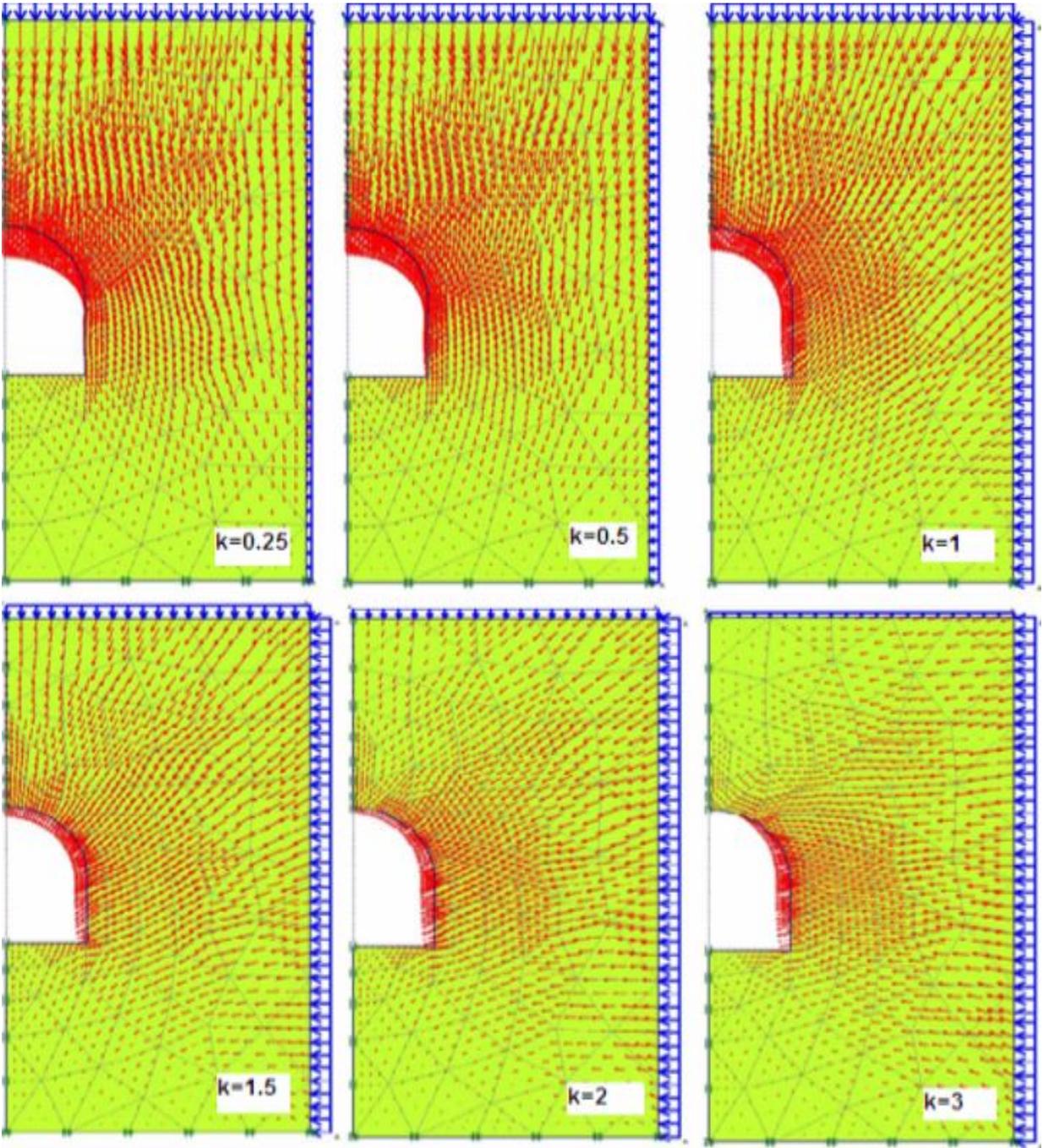
Script Code FLAC, 2018

Figure 7.7 : Perspective du modèle limité

#### 7.4 Analyse des déformations par les critères de design structural

a) Démontrer l'influence de la taille des excavations sur les déformations.

Voici une analyse de sensibilité du paramètre  $K = \sigma_{xx} / \sigma_{yy}$  du modèle ciblé selon la Figure 7.8.



Script PLAXIS, 2019

Figure 7.8 : Sensibilité aux déformations / Influence de K

Et voilà une analyse de sensibilité des déformations selon les critères de design structural selon la Figure 7.9.

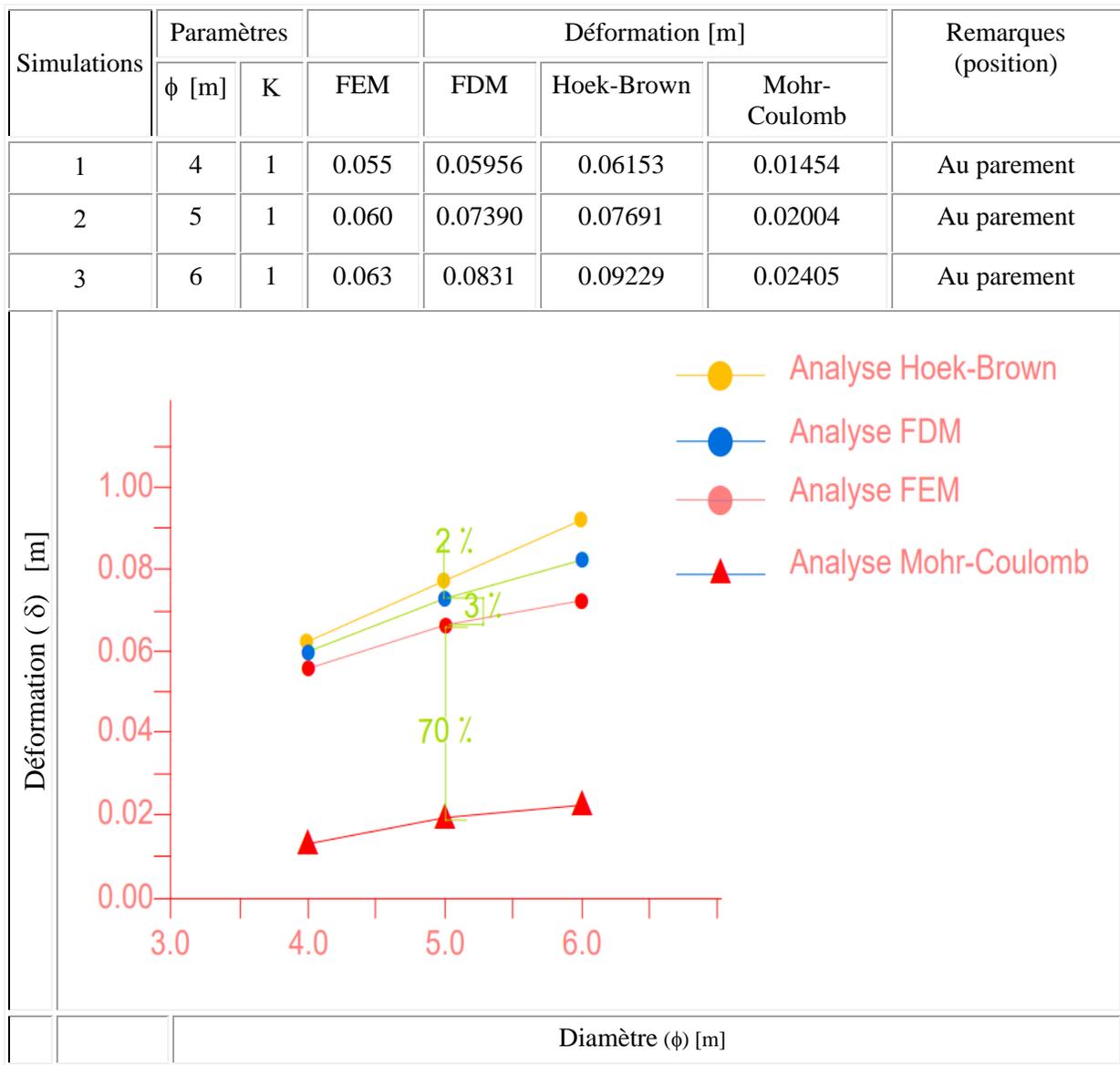
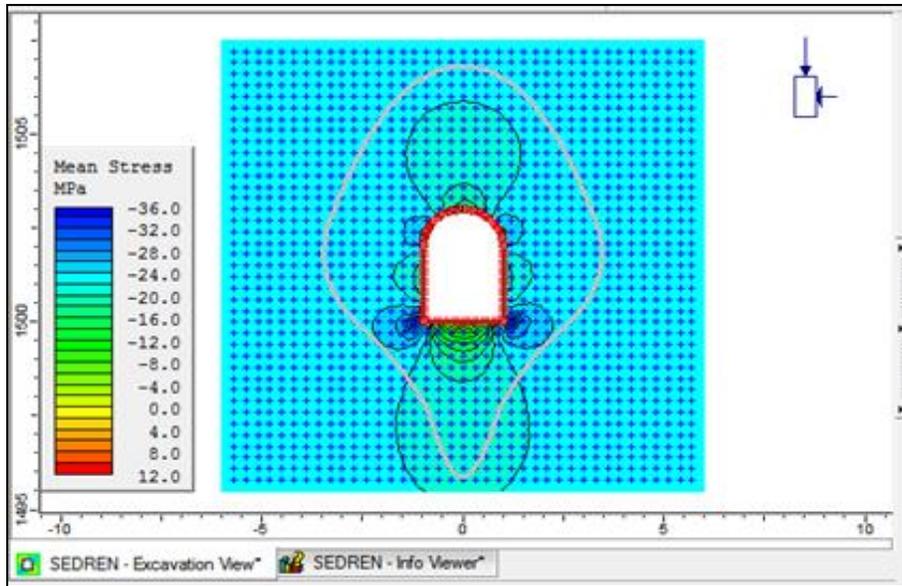


Figure 7.9 : Sensibilité aux déformations / Influence de la taille des cavités - (Diamètre du tunnel (D) = 4, 5, 6 m)

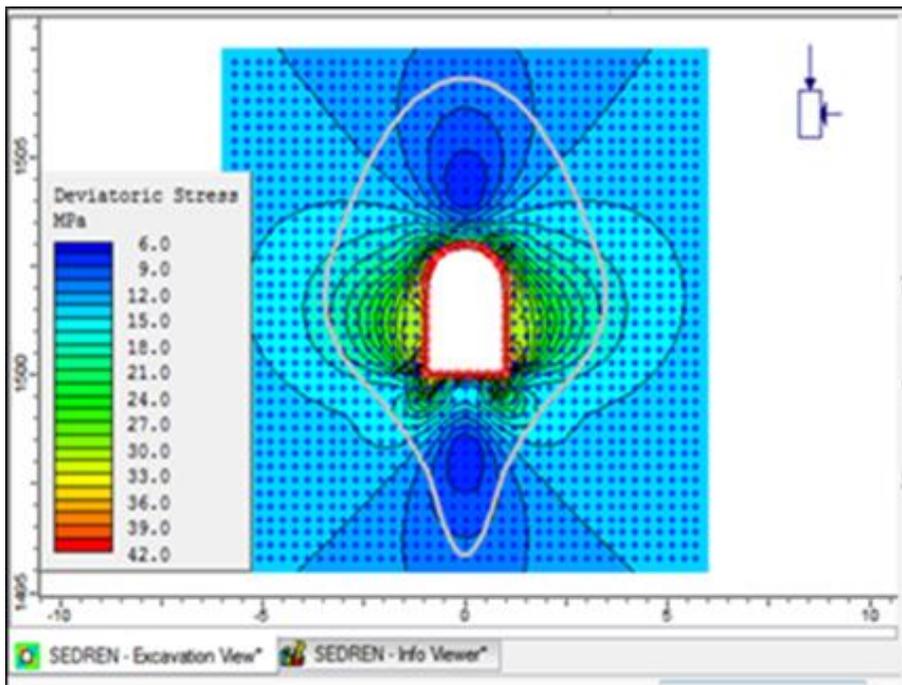
b) Déterminer la zone de confinement de l'excavation

L'Annexe F à l'étape 4 décrit la mécanique de formation d'une zone zone d'influence voire la déformation de la géométrie des cavités. Ce qui suit (Figures 7.10 à 7.13) est une analyse numérique de sensibilité des paramètres ( $p$ ,  $q$ ,  $\tau_{xy}$ ,  $u_{total}$ ) du modèle ciblé.



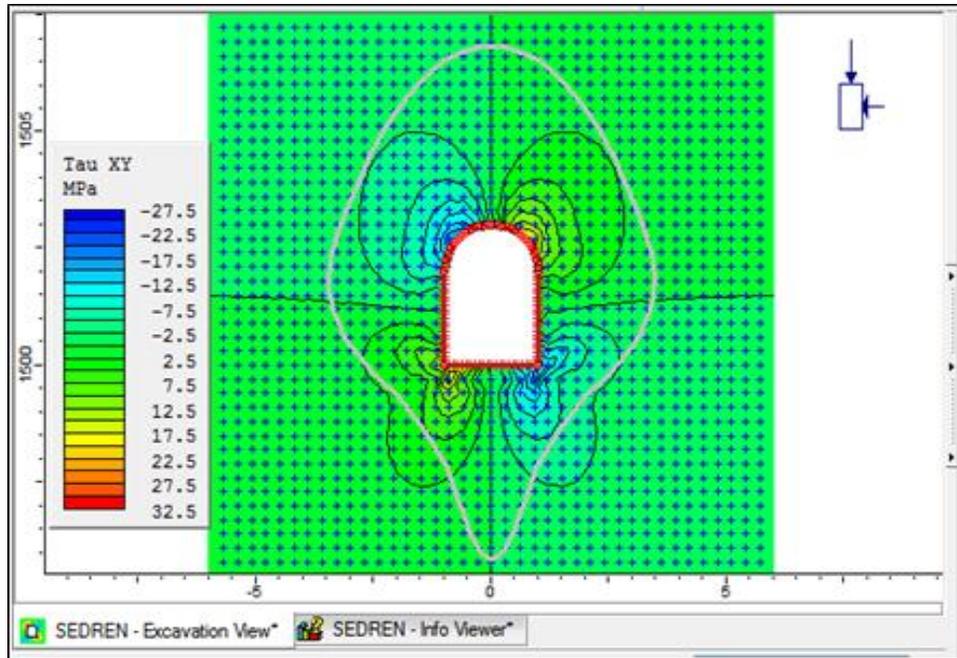
Script EXAMINE 2D, 2018

Figure 7.10 : Sensibilité aux perturbations initiales / Influence de  $p$



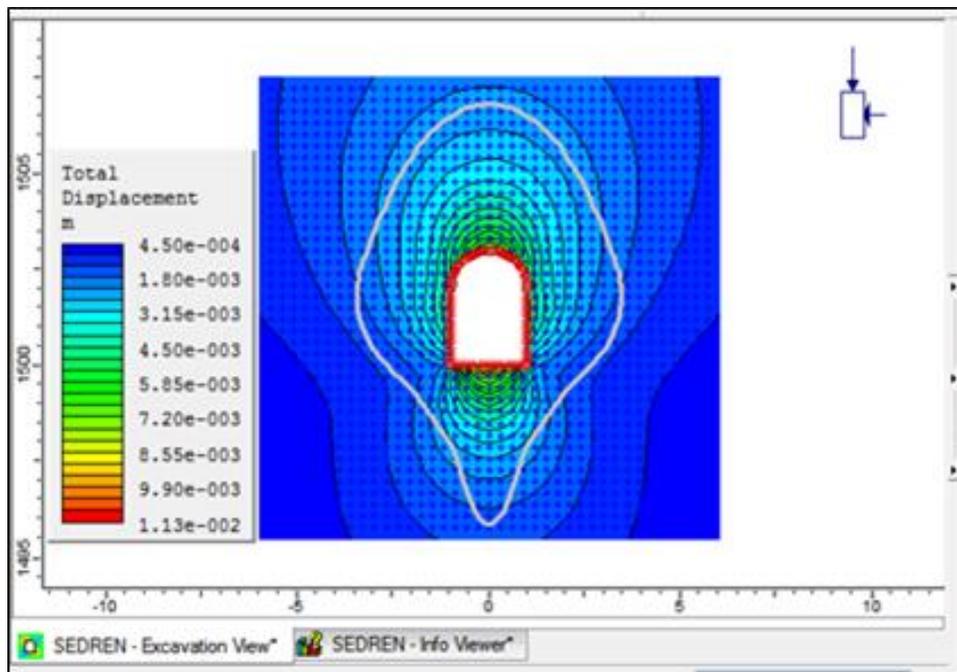
Script EXAMINE 2D, 2018

Figure 7.11 : Sensibilité aux perturbations initiales / Influence de  $q$



Script EXAMINE 2D, 2018

Figure 7.12 : Sensibilité aux perturbations initiales / Influence de  $\tau_{xy}$



Script EXAMINE 2D, 2018

Figure 7.13 : Sensibilité aux perturbations initiales / Influence de  $U_{total}$

c) Statuer sur la stabilité et les besoins en soutènement des excavations

Voici les performances du revêtement du tunnel au préalable. Voir Tableau 7.11.

Tableau 7.11 : Prédiction du Confinement  
(Script Dictatu, 2018)

Récapitulatif des données introduites					
Données relatives au massif					
R : rayon de l'excavation (m)		1.5			
h : profondeur de la galerie (m)		494			
E : module de Young du massif (MPa)		35000			
Coefficient de Poisson		0.3			
Poids volumique du massif (kN/m <sup>3</sup> )		27			
C : cohésion (MPa)		3.626			
Angle de frottement (°)		55.24			
Données relatives au béton					
E, Module de Young du béton (MPa)		25000			
Coefficient de Poisson du béton		0.15			
e, épaisseur du béton (mm)		300			
Contrainte limite admissible du béton (MPa)		35			
λ <sub>s</sub> taux de confinement atteint au moment de la mise en place du soutènement		0.75			
Résultats de calculs obtenus					
Equilibre		Apparition de la plasticité		Déplacement final	
λ <sub>éq</sub>	0.98	λ <sub>a</sub>	0.98	u <sub>fréel</sub> (mm)	0.00
P <sub>i</sub> (MPa)	0.32	P <sub>a</sub> (MPa)	0.31	u <sub>félast</sub> (mm)	0.74
u <sub>s</sub> (mm)	0.73			R <sub>pf</sub> (m),	
R <sub>ps</sub> (m), rayon plastique	1.50	u <sub>a</sub> (mm)	0.73	rayon	1.52
				plastique	

## 7.5 Analyse de sensibilité des paramètres du modèle chargé

Le but de ces simulations est d'éclaircir l'influence de l'orientation du champ initial des contraintes principales sur l'étendue de la zone endommagée et la valeur de l'endommagement maximal au voisinage de l'ouvrage.

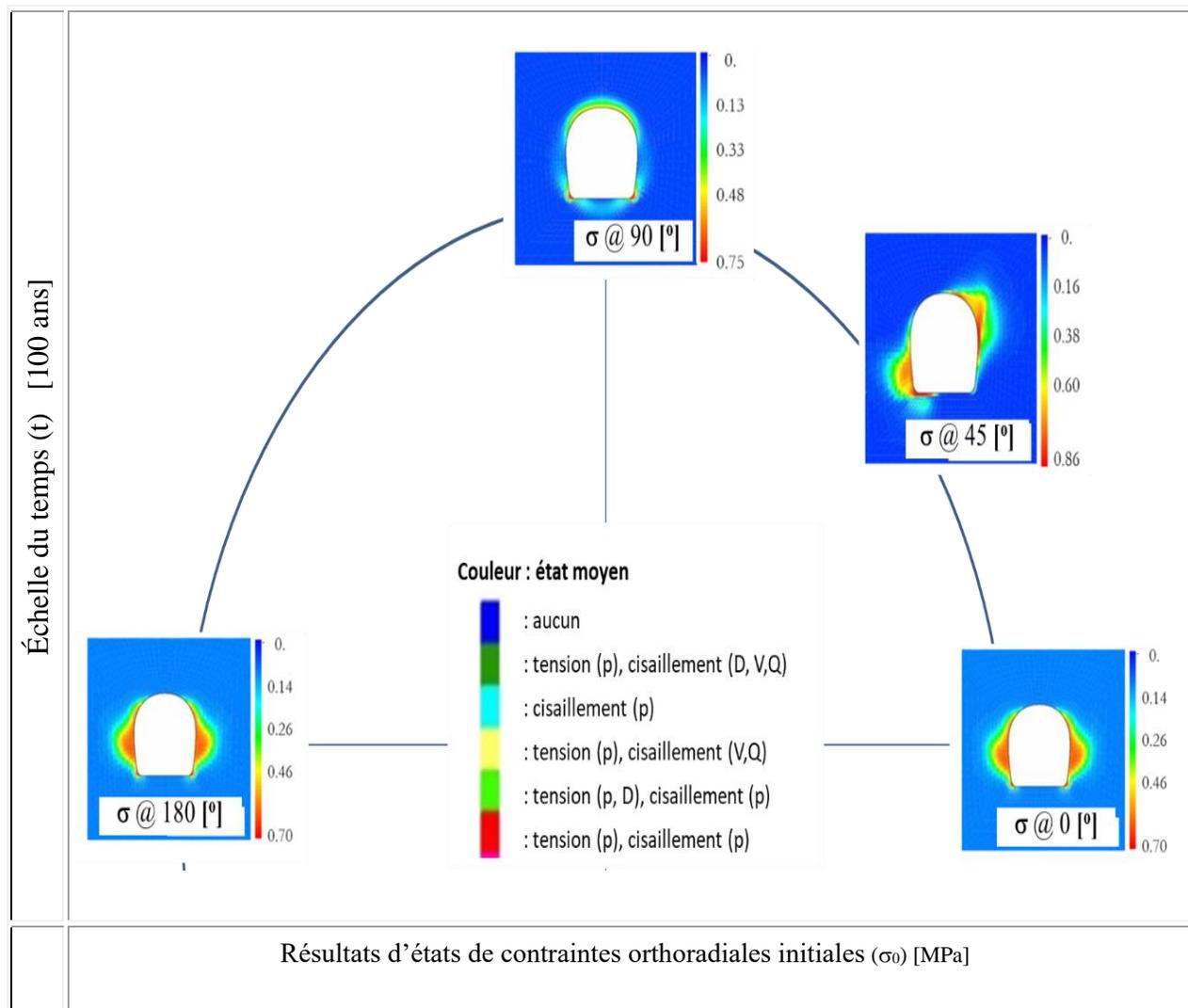
Les paramètres géomécaniques du Tableau 7.12 sont introduits dans le code de calcul pour l'analyse du quartzite du tunnel Mémé. Afin d'observer l'effet du champ de contrainte initiale, nous avons étudié le comportement du tunnel pour 4 inclinaisons des directions des contraintes principales (0°, 45°, 90° et 180°).

Tableau 7.12 : Récapitulatif des paramètres et des calculs effectués

Simulations	État de contraintes initial			Paramètres			Revêtement
	$\sigma_h$ [MPa]	$\sigma_z$ [MPa]	$\theta$ [°]	A [MPa-s]	r [m]	K	
$\sigma$ à 0 [°]	3.8	3.8	0	40	10	68.407	Avec Revêtement
	3.8	2.1	0	40	10	126.367	Sans Revêtement
$\sigma$ à 45 [°]	3.8	2.1	10	40	10	88.714	Avec Revêtement
	3.8	2.1	10	40	10	131.991	Sans Revêtement
$\sigma$ à 90 [°]	3.8	2.1	20	40	10	135.702	Avec Revêtement
	3.8	2.1	30	40	10	142.356	Sans Revêtement
$\sigma$ à 180 [°]	3.8	2.1	30	40	10	121.927	Avec Revêtement
	3.8	2.1	30	40	10	107.621	Sans Revêtement

Note explicative :

Nous remarquons que pour un état de contrainte isotrope, l'endommagement se développe en piédroits de l'ouvrage et en voûte alors que les parois latérales restent pratiquement intactes (Tableau 8.12,  $\sigma$  à 0 [°]). Dans le cas de contrainte anisotrope, les zones endommagées se développent sur les piédroits de la cavité.

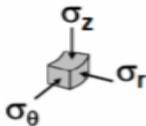


Script Plaxis 2D

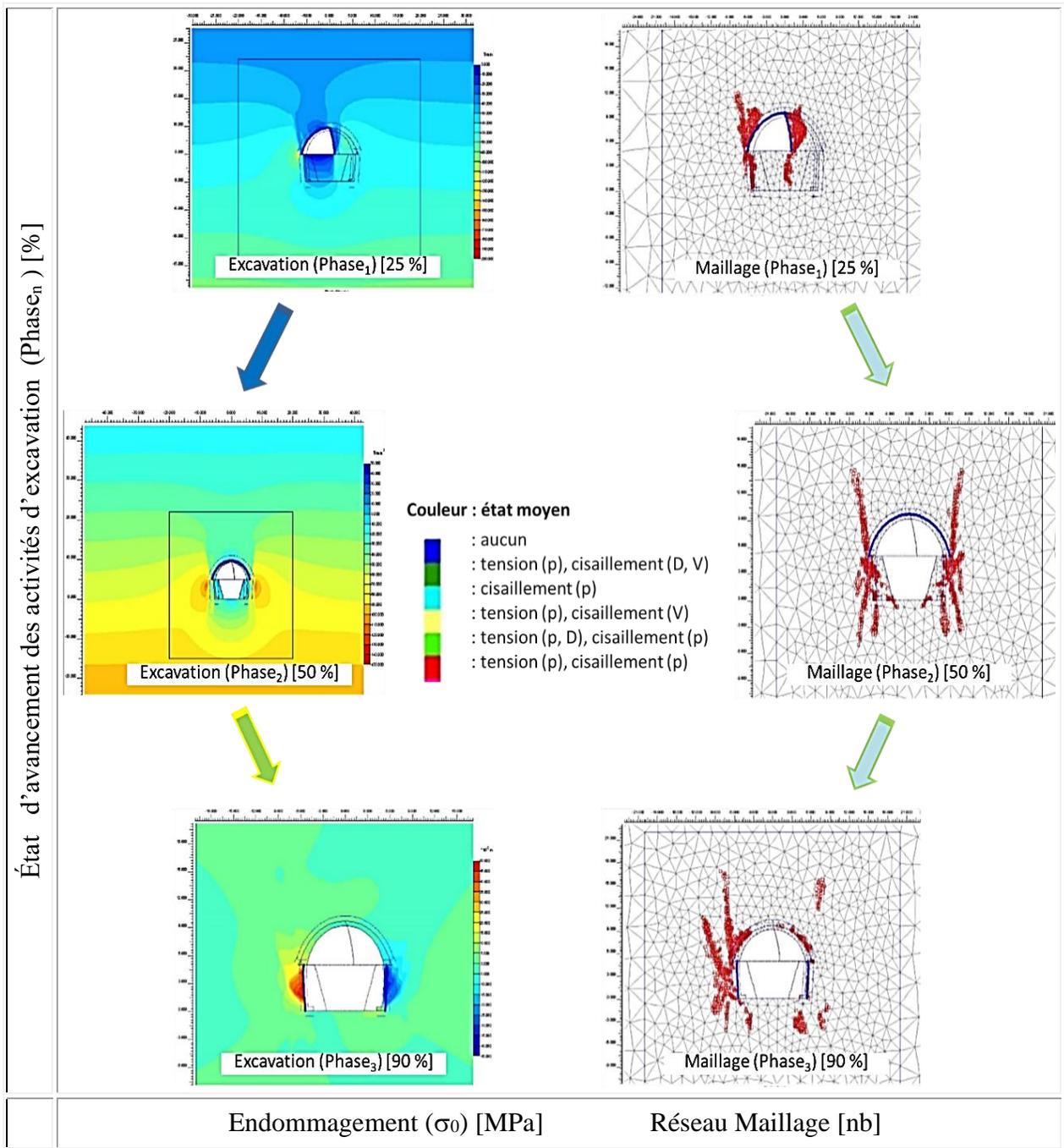
Figure 7.14 : Analyse des zones endommagées après 50 ans autour des cavités

En outre, si l'état de contrainte initial est incliné, nous retrouvons bien une dissymétrie de la distribution de l'endommagement autour du tunnel (Figure 7.14). Les inclinaisons de  $45^\circ$  (ou  $135^\circ$ ) conduisent à des dissymétries de l'endommagement plus importantes alors que les profondeurs des zones perturbées restent très proches ( $\sim 2\text{m}$ ). La Figure 7.14 indique aussi que l'endommagement maximal augmente avec l'orientation du champ de contrainte initial.

Tableau 7.13 : Prédiction du niveau de contraintes dans le tunnel en D de Rayon 2 m et de Hauteur (parement) 2.5 m

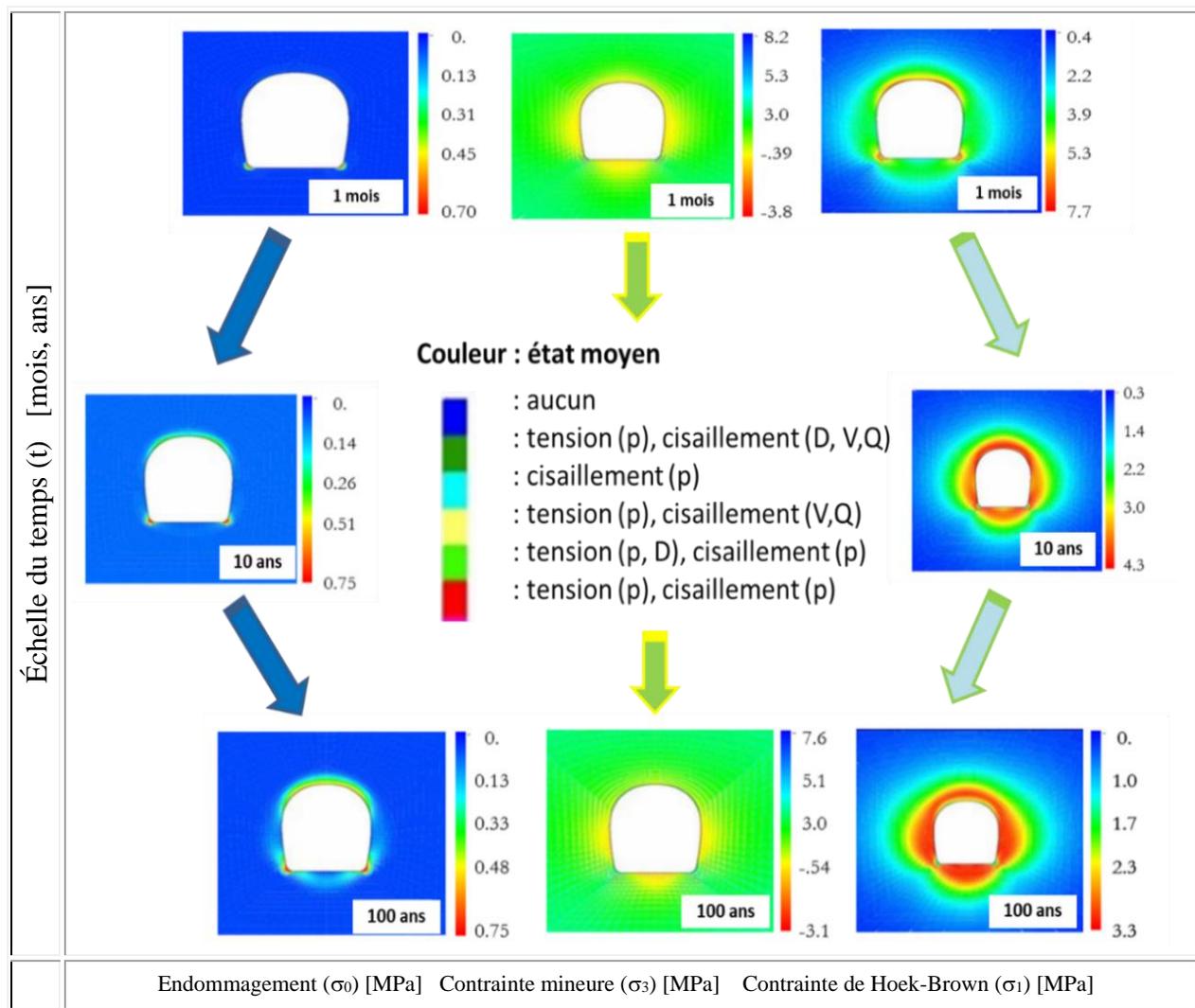
Analyse	Position 	$\sigma_r$	$\sigma_\theta$	$\sigma_r$	$\sigma_\theta$	$\sigma_r$	$\sigma_\theta$	$r_e / r$
		[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	
		$r_e / r_i = 1$	$r_e / r_i = 1$	$r_e / r_i = a$	$r_e / r_i = a$	$r_e / r_i = 3$	$r_e / r_i = 3$	
FEM	À la voûte ( $\theta = 90^\circ$ )	0	5.93892			104.223	68.4071	
	Au parement ( $\theta = 0^\circ$ )	0	92.8654	46.8193	258.868	30.9705	126.367	1.26245
Hoek-Brown	À la voûte ( $\theta = 90^\circ$ )	0	55.0321			105.359	88.7135	
	Au parement ( $\theta = 0^\circ$ )	0	93.3742	29.2111	232.806	54.4609	131.991	1.26245
Mohr-Coulomb	À la voûte ( $\theta = 90^\circ$ )	0	96.5428	28.0742	230.268	106.851	135.701	1.20663
	Au parement ( $\theta = 0^\circ$ )	0	95.5642	52.6248	153.033	101.775	142.355	1.51994
<p>Note explicative : Des résultats de prédiction du niveau de contraintes sont obtenus selon le mode de calculs-types du cas de tunnel circulaire de diamètre 8 m étudié. Voir le Tableau F.1 à l'Annexe F.</p>								

Le Tableau 7.13 illustre l'évolution dans le massif, de l'endommagement, de la contrainte principale mineure et de la contrainte de Coulomb modifiée (Hoek-Brown, 2002 et Montès, 2012). L'analyse des résultats fournit un aperçu sur la localisation des zones les plus sollicitées par rapport aux zones endommagées. Pour toutes les simulations, nous constatons qu'aussitôt après l'excavation, un endommagement important prend naissance aux piédroits du tunnel où des contraintes équivalentes élevées apparaissent. La zone endommagée se propage ensuite vers l'intérieur du massif dans les zones où les contraintes de Hoek-Brown atteignent leurs maximums. L'approche de simuler le modèle fonctionnel est décrit. PLAXIS<sub>2D</sub> est utilisé pour analyser les contraintes induites causant le déplacement des bords de la cavité. Voir Figures 7.14, 7.15 et 7.16 pour des détails sur l'évolution autour du tunnel revêtu, de l'endommagement, de la contrainte principale mineure et de la contrainte de Mohr modifiée.



Script FLAC<sub>2D</sub>

Figure 7.15: Analyse du processus d'endommagement durant l'excavation - Le modèle est appliqué avec une contrainte de compression verticale et horizontale d'abord à limites pour simuler les contraintes in situ. Les contraintes sont maintenues constantes, tandis que les fouilles en trois étapes sont modélisées. La déformation et l'échec sont surveillés pendant l'excavation. À la deuxième étape, les déplacements verticaux ont lieu au sommet, avec un déplacement maximal d'environ 1  $\mu\text{m}$ . Les déplacements à la base sont faibles. Les déplacements horizontaux significatifs sont notés sur deux parois latérales, avec un déplacement maximum de 3  $\mu\text{m}$ .



Script Plaxis 2D

Figure 7.16 : Analyse du processus d'endommagement post-excavation (après 1 mois, 10 ans et 100 ans) autour des cavités - Résultats d'états de contraintes orthoradiales obtenus par simulation - Lorsque l'excavation est terminée, le déplacement des zones s'étendent. Les résultats montrent que les zones de déplacement horizontal sont considérablement grande, environ 4 fois celle de la largeur d'excavation.

Les distributions de la contrainte orthoradiale et de l'endommagement suivant l'axe horizontal sont présentés pour différents instants sur la Figure 8.16. Cette figure met en évidence un premier résultat qui indique que juste après l'excavation, sur la paroi de la cavité, la contrainte radiale s'annule tandis que la contrainte orthoradiale est multipliée par un facteur qui dépend de l'état de contraintes initial dans le massif. Cependant, pour des temps plus importants, nous retrouvons bien le processus de progression de l'endommagement qui fait que la zone de concentration de la contrainte équivalente s'écarte de la paroi.

## 7.6 Validité des résultats

Après une présentation de l'ouvrage étudié et des principales hypothèses, les résultats de calculs sont comparés aux observations faites in situ sur l'évolution des zones endommagées (Figures 7.14, 7.15 et 7.16). Les mécanismes responsables de l'endommagement de la roche autour de la cavité sont exposés. L'influence d'un soutènement est également examinée. Bien que le modèle utilisé ne prenne pas en compte tous les aspects liés au comportement des roches, nous montrons dans cette étude que le modèle viscoplastique endommageable conduit à des résultats raisonnables. Les limites de ce modèle sont établies et des recommandations sont formulées pour améliorer ses performances.

## 7.7 Conclusion

Ce chapitre présente une analyse du comportement différé autour des cavités souterraines en déterminant l'évolution de la zone endommagée au cours du temps. Le comportement du matériau est modélisé par la loi viscoplastique endommageable de CVISC. Et le code PLAXIS<sub>2D</sub> a été utilisé à cette fin. Il est révélé : « L'endommagement croît alors dans ces zones jusqu'à une valeur maximale en générant une diminution considérable de la contrainte équivalente qui indique une forte détérioration de la roche ».

A cet instant, les contraintes sont redistribuées aux points adjacents situés vers l'intérieur du massif qui s'endommagent à leur tour. Conséquemment, nous constatons que sur les Figures 8.14, 7.15 et 7.16 une zone à contrainte élevée s'écarte des parois du tunnel et provoque l'extension de la zone endommagée. Toutefois, l'endommagement maximal reste localisé à proximité de la paroi. Néanmoins, l'endommagement le long des parois verticales de la cavité reste faible malgré la forte convergence observée et les contraintes de tractions élevées qui s'y sont développées et qui sont, en certains points, sont comparables à la résistance à la traction de la roche. Cette insuffisance des résultats est due au fait que le modèle de Lemaître utilisé pour ces simulations est basé sur le critère de Von Mises qui ne se limite pas qu'à la traction puisque c'est un critère ouvert (Tableau 3.8). De plus, ce modèle ne prend pas en compte le fait que la résistance au cisaillement des géomatériaux dépend fortement de la contrainte moyenne. Ce qui devrait, dans le cas présent, se traduire par une accélération de la propagation de l'endommagement.

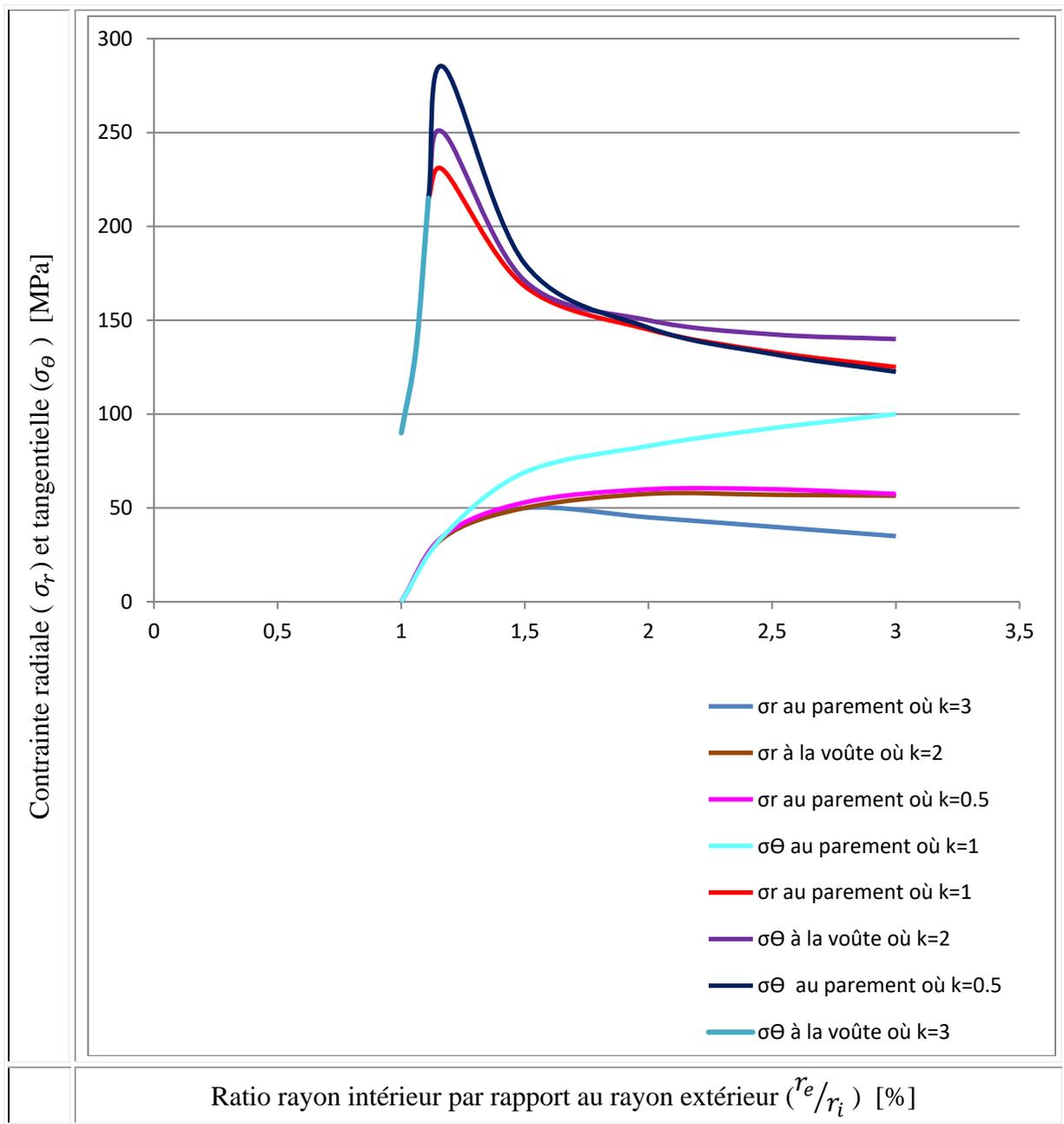


Figure 7.17 : Variation des contraintes à la périphérie de la voûte du tunnel pour différentes valeurs de K .

Dans le cadre de cette recherche, il se révèle d'après les Figures 8.17 et 8.18 : Le tunnel en Fer-à-cheval devrait être le choix prioritaire pour une réhabilitation versus toute autre forme de tunnel (circulaire, D, ellipse etc. ) puisqu'il offre plus de performance .

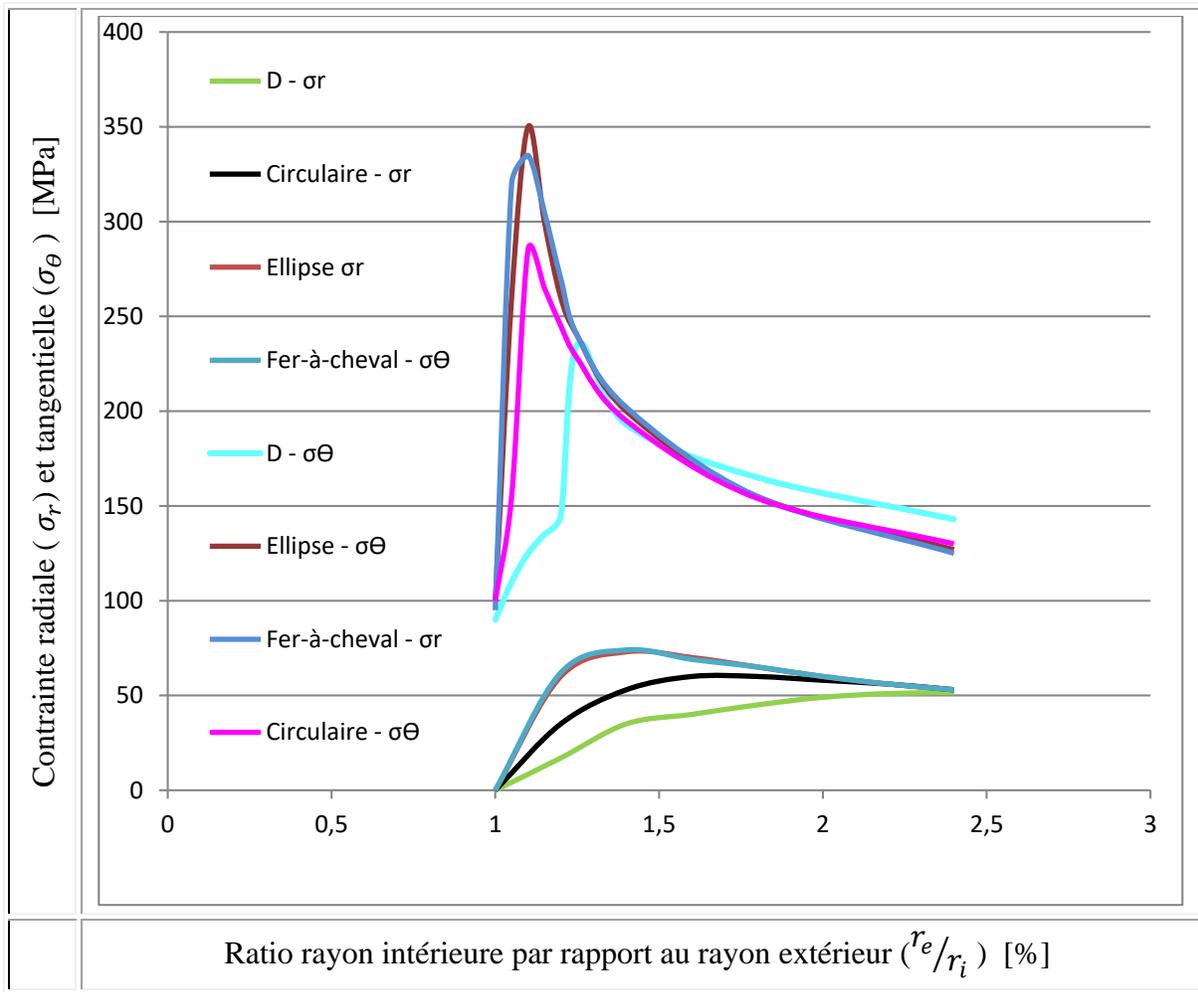


Figure 7.18 : Contraintes à la périphérie de parement du tunnel pour différentes valeurs de  $K$ .

## **CHAPITRE 8**

### **ANALYSE DES RÉSULTATS DE DÉFORMATION DES GALERIES ÉTUDIÉES**

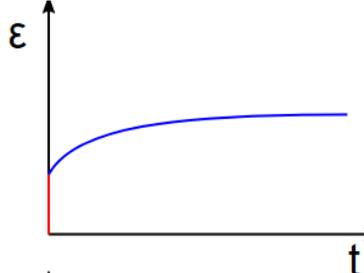
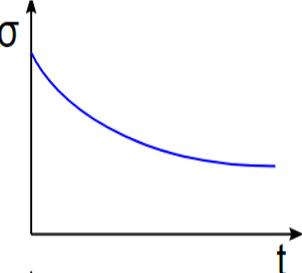
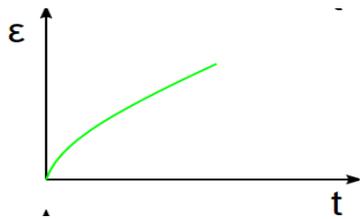
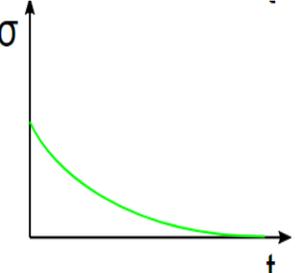
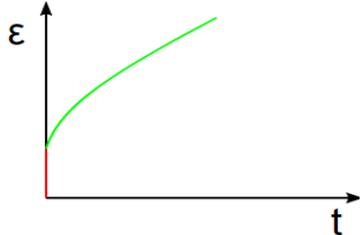
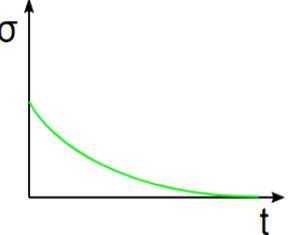
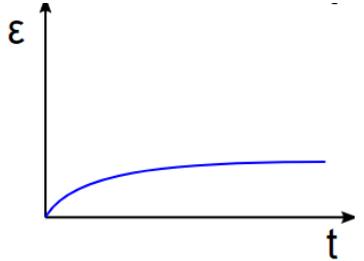
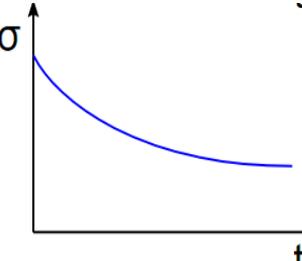
Les approches pour évaluer le potentiel de confinement sont nombreuses : l'approche empirique, l'approche par le tenseur de contraintes et l'approche par déformation. L'approche empirique des terrains poussants est historiquement présentée par la classification géomécanique de Barton (2000) tandis que l'approche moderne tensorielle est complétée par Tomanovic (2006). L'approche par déformation est reliée à la recherche contributive. L'analyse est effectuée à l'aide des combinaisons mécaniques analogues indiquées dans la revue de littérature (Tableau 4.4). De cette façon, le comportement des composants des modèles Zener (1965), Jeffrey (1964) et Burgers (1948) ainsi que l'influence des différentes limites (uniaxiale versus triaxiale) et de chargement (taux de contrainte constant ou taux de déformation) sont examinés.

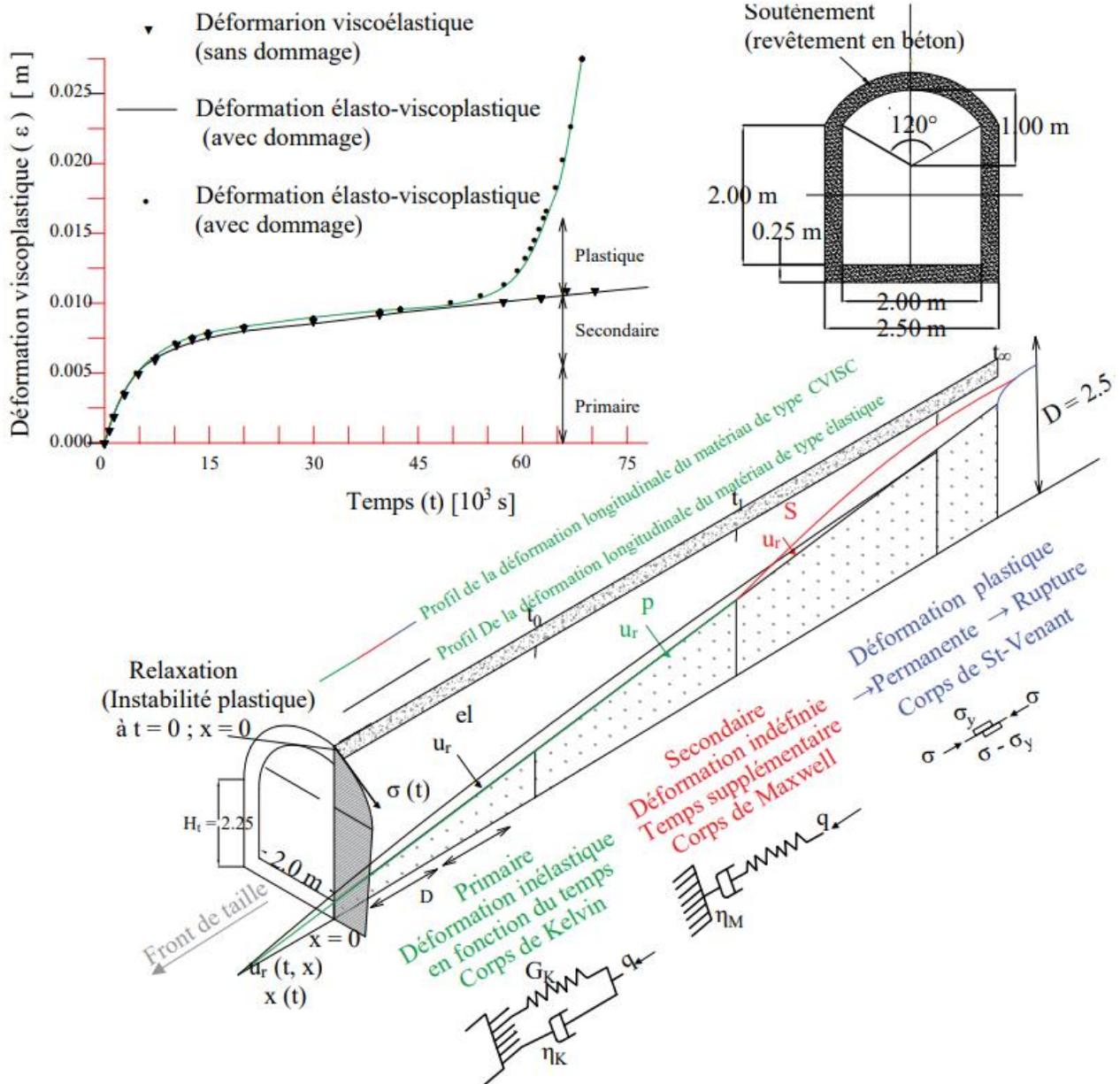
#### 8.1 L'approche adoptée

Le revêtement des galeries de la mine Sedren est fabriqué tout aussi avec les caractéristiques précitées. Il ne fait pas exception à la règle c'est-à-dire son modèle a l'allure des courbes caractéristiques de convergence de référence. Voir Figure 1.16. La plupart des modèles de fluage, tel que discuté précédemment, ne peuvent satisfaire que sous certaines conditions et états. Tous les modèles de type CVISC sont adaptables. De prime abord, une comparaison des modèles développés simulables existants facilite la discussion des résultats obtenus de la méthode de convergence – confinement. L'approche adoptée est une procédure d'interaction entre le massif rocheux et le revêtement pour un tunnel en D profond basée sur de nouvelles solutions

La Figure 8.1 illustre le Profil de déformation longitudinale (PDL) du modèle de tunnel ciblé dans un milieu viscoélastique où aucun fluage tertiaire n'a lieu. Le quartzite peut se comporter de la même manière. L'infrastructure (Figure 8.1) subit les trois étapes de fluage jusqu'à la rupture. Cette réponse est attendue en cas de compression sévère des massifs rocheux où le comportement au fluage induit conduit le matériau à la rupture après présentant de grandes déformations et une convergence notable.

Tableau 8.1 : Comparaison des modèles de 3 versus 4 éléments

Nb. Éléments du Modèle	Fluage	Relaxation	Option
3 éléments / solide Modèle Zener /SLS (1965)			(9.1-01)
2 éléments / liquide Modèle Jeffreys (1964)			(9.1-02)
4 éléments / liquide Modèle Burgers (1948)			(9.1-03)
4 éléments / solide Modèle adaptable (relié à la recherche)			(9.1-04)
<p>Note explicative :</p> <p>L'option 04 dans le Tableau ci-contre est prioritaire. Il est adaptable malgré ses limites et ses impacts résultant de conditions aux limites différentes. Il s'impose d'emblée pour la nouvelle contribution.</p>			



(Adapté de Flac, version 8.0, 2018)

Figure 8.1 : Profil de déplacement longitudinal (PDL) dans un milieu viscoélastique du modèle linéaire (4 éléments / liquide) de Burgers – Les effets de l'avancement du tunnel et du temps sur les déplacements radiaux totaux observés dans les parois du tunnel sont représentés et exprimés sous la forme du PDL d'un tunnel en D sans support dans un milieu viscoplastique (où :  $r$  est le rayon du tunnel,  $D$  est la hauteur maximale du tunnel,  $t$  désigne le temps,  $x(t)$  désigne la profondeur de la face du tunnel,  $u_r(t, x)$  se réfère au déplacement radial de la paroi du tunnel,  $\sigma(t)$  est la contrainte appliquée, les indices M, K, y se réfèrent respectivement aux modèles Kelvin et Maxwell et au seuil d'élasticité);  $p$  : courbe de déformation viscoplastique ;  $q$  : contrainte de confinement exercée ;  $t$  : temps ;  $x$  : déplacement.;  $u_r$  : déformation au stade de fluage r ;  $\epsilon_l$  : mesure de fluage initial ; S : Courbe de fluage. Les unités sont en SI; les mesures sont en mètres.

## 8.2 Présentation des résultats de fluage

Dans le cadre de l'étude, plusieurs essais de fluage <sup>64</sup> ont été effectués en laboratoire sur les carottes d'un sondage en 2018. Les valeurs de la résistance à la compression simple et à la traction sont respectivement comprises entre 10 MPa et 20 MPa, et entre 0.1 MPa et 4.0 MPa. On dispose également de résultats d'une caractérisation mécanique réalisée sur un basalte très altéré prélevé à l'adit de la galerie de la mine Sedren.

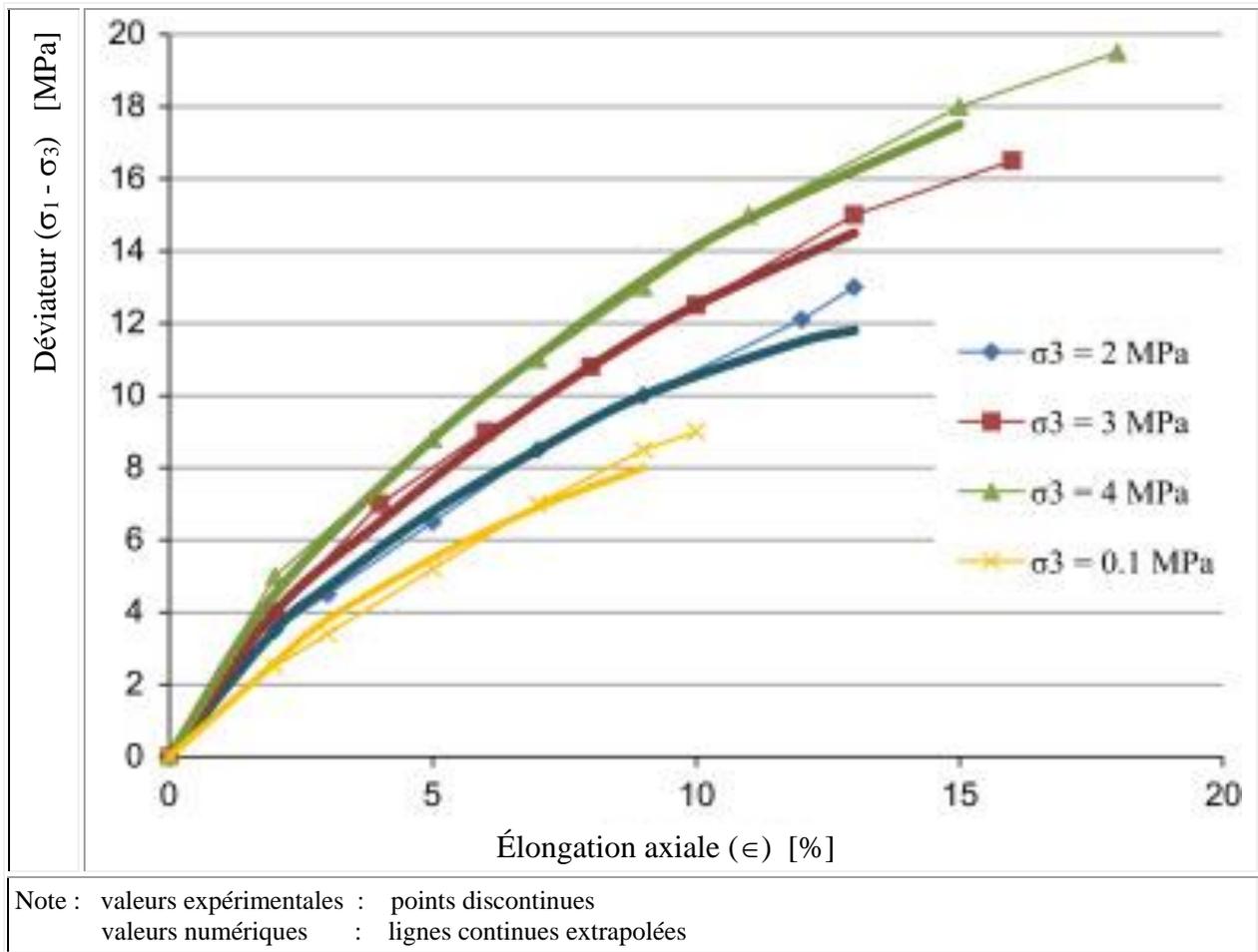


Figure 8.2 : Courbes expérimentales de fluage d'échantillons de roches basaltiques à l'adit de la galerie Casséus de la mine Sedren

<sup>64</sup> Les résultats de contraintes utilisées lors des séances d'expérimentation de fluage sur des échantillons de roches basaltiques sont prélevés à l'adit de la galerie Casséus de la mine Sedren. Voir détails à l'Annexe E.

La Figure 8.2 montre les courbes de fluage d'échantillons de roches basaltiques fracturées à la galerie Casséus. Pour l'identification du modèle, quatre paramètres<sup>65</sup> viscoplastiques ( $A_0$ ,  $K_0$ ,  $\eta_0$ ,  $m_i$ ) de Purwodihardjo (2004), facteurs responsables du potentiel d'un massif rocheux, sont considérés pour l'étude du comportement poussant.

## Récapitulatif des données introduites (DANS LE CODE DIDACTU)

=> [Méthodes analytiques](#) \ [Elasto-viscoplastique](#) \ Panet

### Paramètres de géométrie et de soutènement

Profondeur du tunnel :	495 m
Rayon :	1.5 m
Distance radiale :	2.5 m
Pression intérieure $p_i$ :	0.32 MPa
Contrainte effet de voûte $\sigma_g$ :	0.036 MPa

### Paramètres géologiques

Poids du sol $\gamma_d$ :	26 kN/m <sup>3</sup>
Module de Young E :	60000 MPa
Coefficient de Poisson ( $\nu$ ) :	0.21
Cohésion du sol c :	0.959 MPa
Angle de frottement $\phi$ :	42°
Angle de dilatation $\psi$ :	6.5°
Charge hydraulique :	1 m
Contrainte initiale $p_0$ (calculé):	12.854 MPa

---

<sup>65</sup> Référez à la Figure 2.10 pour des détails sur l'étude paramétrique sur des essais de fluage tels que :

- $A_0$  caractérise l'évolution de la fonction de retard.
- $K_0$  caractérise l'évolution de la viscosité du matériau en fonction du niveau de contrainte appliquée.
- $\eta_0$  définit la valeur initiale de la vitesse de la déformation différée.
- $m_i$  module la pente de la diminution de la déformation différée du modèle.

### 8.3 Analyse des déformations par la méthode de convergence-confinement

Les Figures 8.3 à 8.6 présentées illustrent le procédé de convergence et de confinement des galeries jusqu'à sa phase viscoplastique.

## RÉCAPUTILATIF DES RÉSULTATS (DANS LE CODE DIDACTU)

=> [Méthodes analytiques](#) / [Viscoplastique](#) / [Panet](#)

Valeurs numériques au point demandé

Sigma r :	3,917 MPa	Figure 9.3 (ci-après)
Sigma $\theta$ :	15,014 MPa	Figure 9.4 (ci-après)
Déplacement radial :	0,479 mm	Figure 9.5 (ci-après)
* Rayon plastique :	2,858 m	

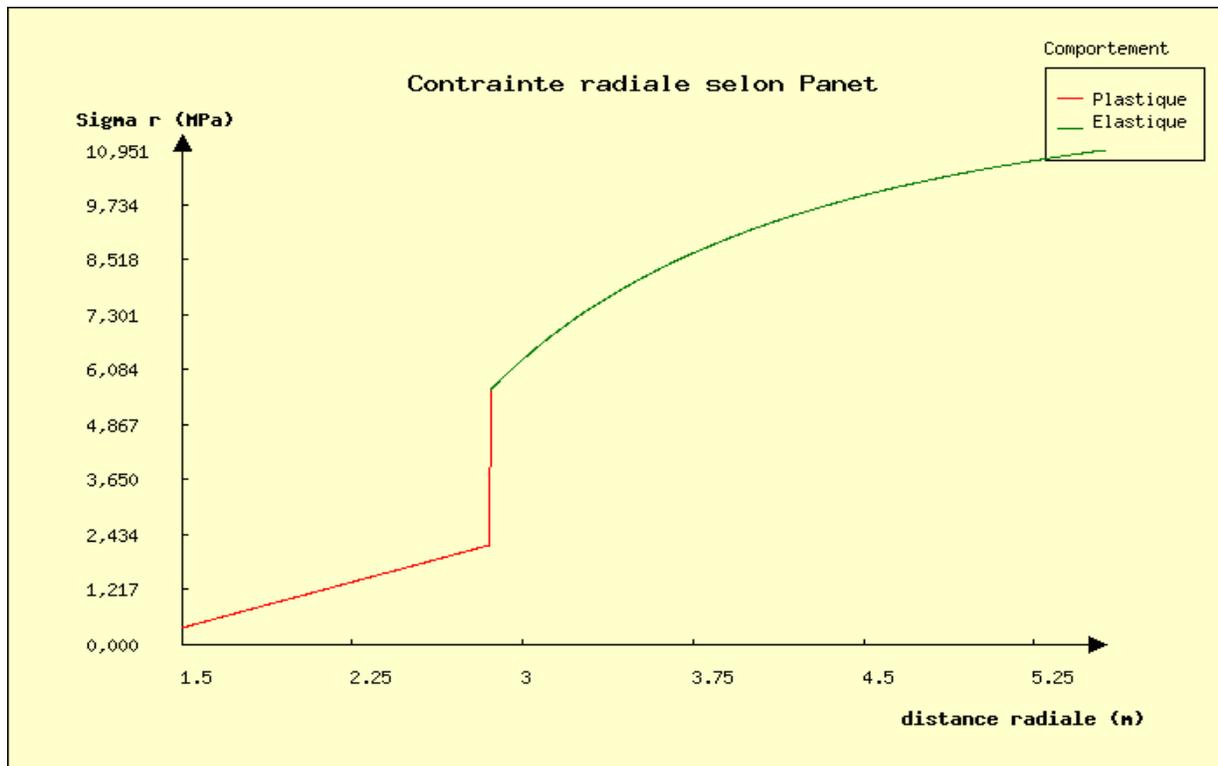


Figure 8.3 : Courbes de contrainte radiale ( $\sigma_r$  en MPa) versus distance radiale ( $d_r$  en m)

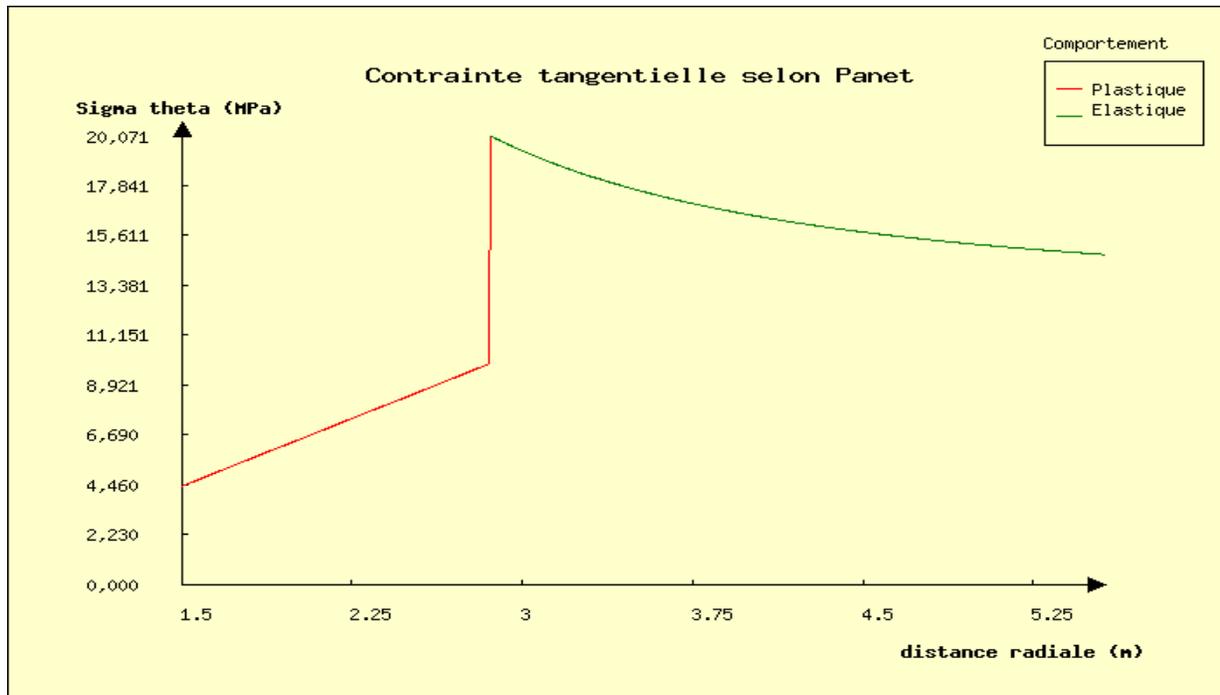


Figure 8.4 : Courbes de contrainte tangentielle ( $\sigma_{\theta}$  en MPa) versus distance radiale ( $r$  en m)

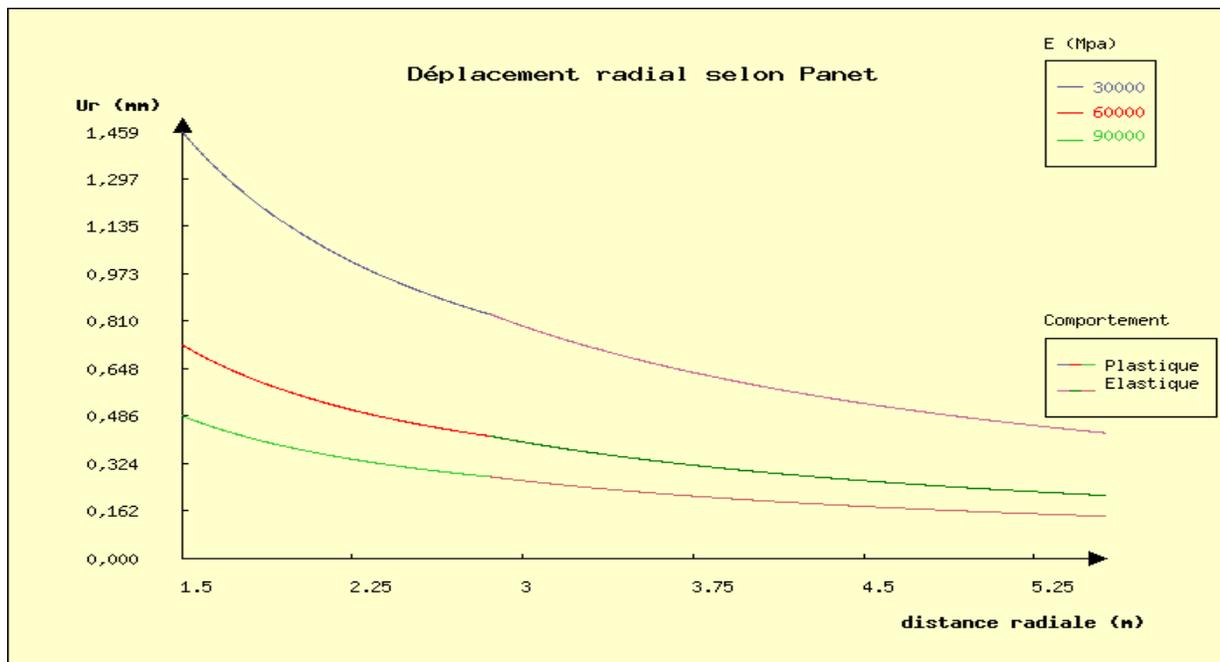


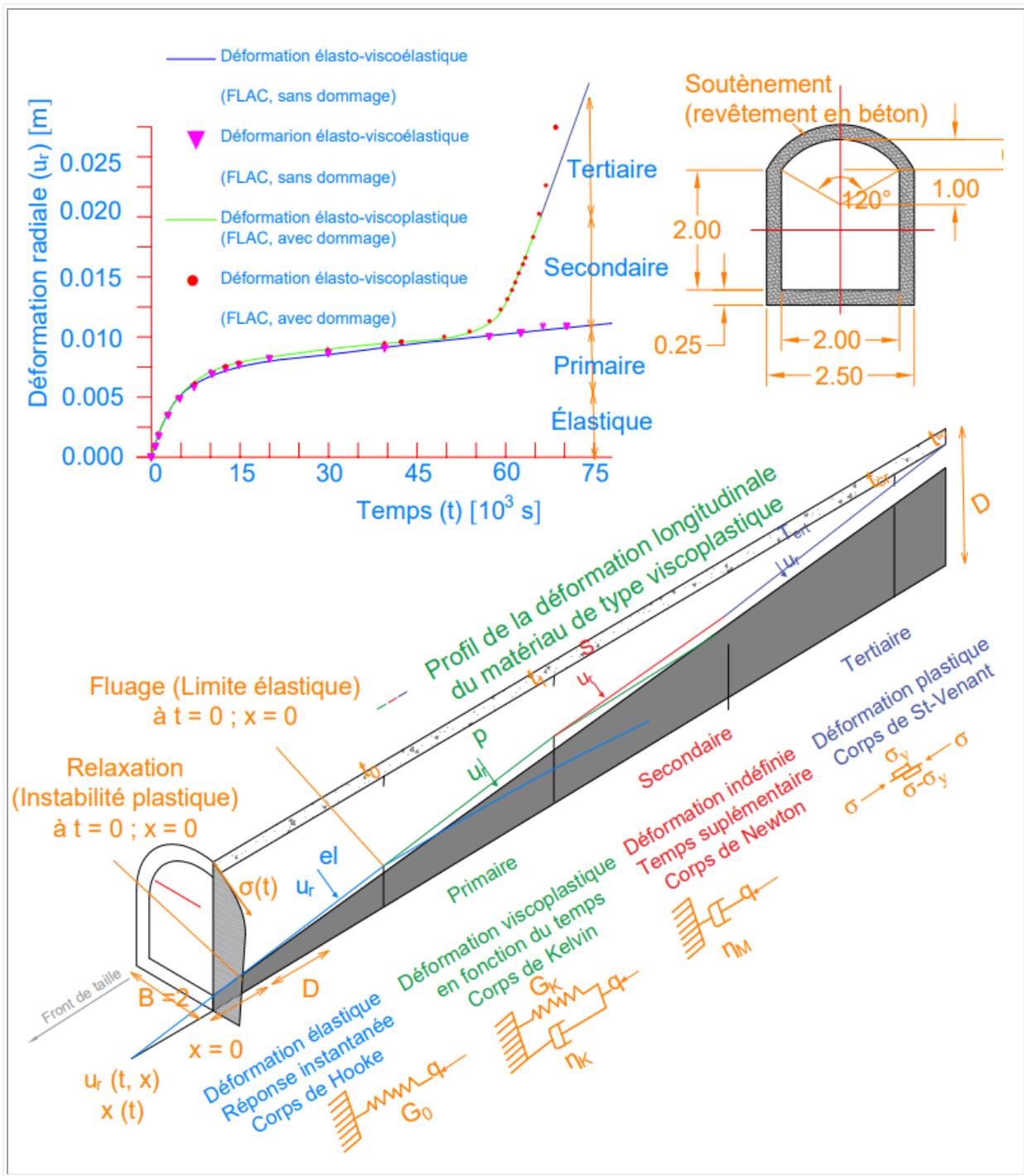
Figure 8.5 : Courbes de confinement ( $U_r$  en mm) du massif rocheux en fonction du déplacement ( $Y$  en m)

Lors de l'excavation d'un tunnel, le déplacement accumulé de la paroi et la charge du support du tunnel sont les résultats à la fois de l'avancée du tunnel (longueur du tour et temps de cycle) et du comportement dépendant du temps du massif rocheux environnant. L'approche actuelle pour analyser l'augmentation du déplacement de la paroi du tunnel est basée sur la méthode de convergence-confinement (CCM) réalisée avec soit des solutions analytiques (solutions de forme fermée), soit l'utilisation des profils de déplacement longitudinal. Cette approche néglige l'influence de la dépendance au temps qui entraîne une déformation retardée qui peut se manifester même quelques minutes ou heures après l'excavation. Le fait de ne pas prendre en compte les déplacements supplémentaires dans la conception préliminaire peut entraîner une fausse sélection de l'heure d'installation et du type de système de support, entraînant des problèmes de sécurité pour le personnel de travail, entraînant des dépassements de coûts et des retards de livraison des projets. Cette étude se concentre sur l'investigation et l'analyse des déplacements totaux autour d'un tunnel en D dans un milieu viscoélastique en réalisant une modélisation isotrope axisymétrique par différences finies, proposant une approche nouvelle, mais simplifiée que les praticiens peuvent utiliser en tenant compte de l'effet du temps.

#### 8.4 Validité des résultats

Dans cette analyse, des limitations de Didactu<sub>2D</sub> sont expérimentées. Tout comme dans PLAXIS<sub>2D</sub>, nous sommes incapables de considérer et calculer les réactions dans les supports d'installations. Cependant, il est possible de le faire avec FLAC<sub>2D</sub>. La version 8.0 de ce code numérique aux différences finies fonctionne non seulement avec des données discrètes; elle possède un environnement graphique robuste qui tient compte de la géométrie de la structure voire les propriétés du matériau de sa phase élastique jusqu'à sa phase viscoplastique.

Le tunneling est considéré comme un problème tridimensionnel où les déplacements radiaux observés sur les parois du tunnel lors de la construction sont fonction non seulement de l'avancement du tunnel, mais aussi du temps de comportement du massif rocheux excavé. À cet égard, un aperçu des méthodes conventionnelles utilisées pour prédire le profil de déplacement longitudinal des déplacements radiaux est présenté et les limites sont mises en évidence (Figure 8.6).



Script FLAC<sub>2D</sub>

Figure 8.6 : Représentation schématique des Déformation Longitudinale (PDL) du modèle développé (4 éléments / solide adaptable relié à la recherche) dans un milieu élasto-viscoplastique. (a) Modèle (b) la courbe de fluage primaire et secondaire (c) la courbe complète de fluage primaire à tertiaire.

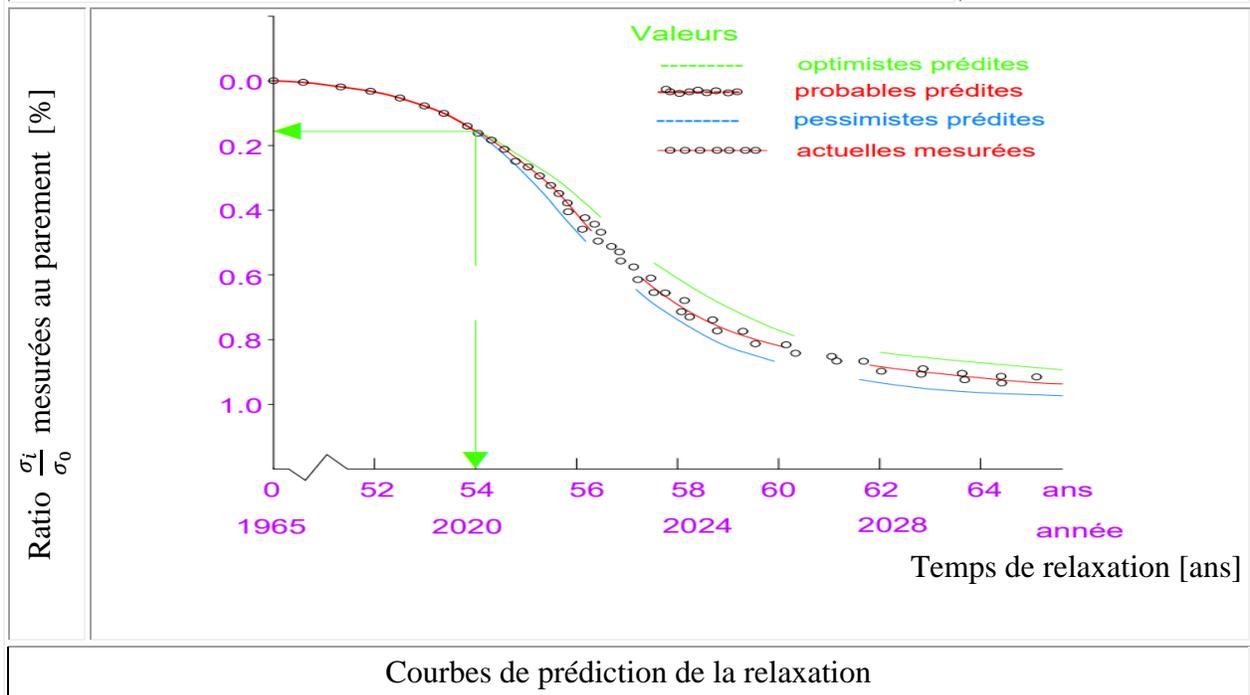
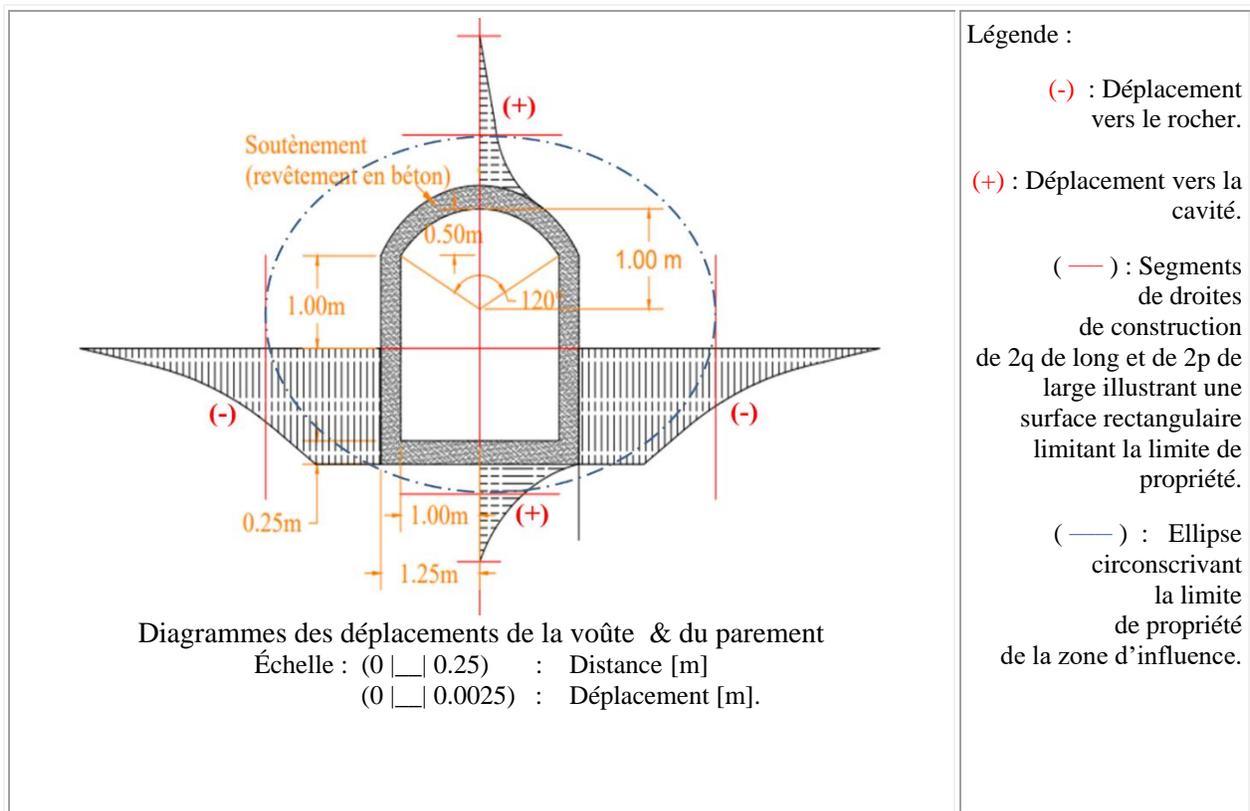


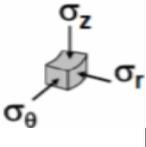
Figure 8.7 : Sensibilités de la voûte et du parement du tunnel de l'adit de Mémé. - À remarquer : a) le déplacement du rayon radial réduit dans le temps ; b) la contrainte dans le temps décroît à cause du creusement dans le parement. Voir Annexe J pour des détails.

Une étude axisymétrique paramétrique est utilisée en tenant compte de l'avancement du tunnel et le temps de fluage. Trois ensembles de modèles avec différents paramètres viscoélastiques sont étudiés. Il est démontré que l'effet de seuil du fluage primaire peut conduire à une augmentation de 50% du déplacement initial. De même, il est démontré que les paramètres de fluage contrôlent le temps écoulé jusqu'à l'atteinte d'une valeur constante. Il n'y a pas de limite théorique lorsque l'on considère le fluage secondaire. La séparation des deux étapes primaire et secondaire a montré que les déplacements globaux sont sous-estimés par rapport au comportement de fluage prévisible lequel est considéré comme une limite inférieure. Enfin, des données de tunnel sont présentées où des déformations dépendant du temps ont été exposées, des résultats relatifs à cette étude ont été dérivés. Une enquête détaillée est recommandée lorsqu'il s'agit de roches et des massifs rocheux qui montrent un potentiel dépendant du temps. Il a été démontré que si aucun effet temporel n'est pris en compte, le total des déplacements sont sous-estimés d'après la Figure 9.7. Ce qui peut conduire à des calculs erronés aux premières étapes dans le processus de conception.

## 9.5 Conclusion

La thèse élabore un modèle de comportement d'écrouissage positif basé sur des approches simples, sur des modèles de rupture *Mohr-Coulomb modifié* (Hoek-Brown). Ce critère de résistance mécanique, quoique simple, permet de valider le comportement observé sur le terrain. En effet, l'observation de la *zone d'influence* des parois de la mine Sedren indique que ce comportement est directement dû à des foliations et à des discontinuités du massif rocheux. Les résultats de simulation confirment les potentialités de la modélisation viscoplastique endommageable et démontrent que le modèle viscoplastique développé est en mesure de reproduire qualitativement et quantitativement le processus d'endommagement autour des cavités.

La déformation avec l'approche de Mohr-Coulomb est la même que Hoek-Brown mais la distance radiale et la contrainte sont différentes quand le matériau atteint la limite élasto-plastique. La Figure 8.8 permet de conclure que le modèle linéaire simple développé est correct puisque la contrainte hydrostatique ( $\sigma_1 = \sigma_3$ ) annule tous les termes en  $\theta$  et donne exactement les mêmes expressions que celles de Lamé. Les résultats du modèle viscoplastique de Hoek-Brown sont comparables à ceux des modèles parfaitement plastiques de FEM, de FDM et de Mohr-Coulomb.

Analyse	Position 	$r/r_i = 1$		$r/r_i = r_e/r_i$		$r/r_i = 3$		Note explicative:
		$\sigma_r$ [MPa]	$\sigma_\theta$ [MPa]	$\sigma_r$ [MPa]	$\sigma_\theta$ [MPa]	$\sigma_r$ [MPa]	$\sigma_\theta$ [MPa]	
FDM (FLAC <sub>2D</sub> )	À la voûte	0.0	93.045	12.542	103.172	0.01454	<b>1.081</b>	Les calculs se font selon la position de coordonnées polaires.
	Au parement	0.0	89.111	16.193	101.946		1.750	
FEM (Plaxis <sub>2D</sub> )	À la voûte	0.0	93.045	12.542	103.172	0.01454	<b>1.081</b>	
	Au parement	0.0	89.111	16.193	101.946		1.107	
M-C		0.0	89.116	10.647	95.336	0.02004	<b>1.081</b>	
H-B		0.0	9.497	12.666	203.333	0.02405	1.750	

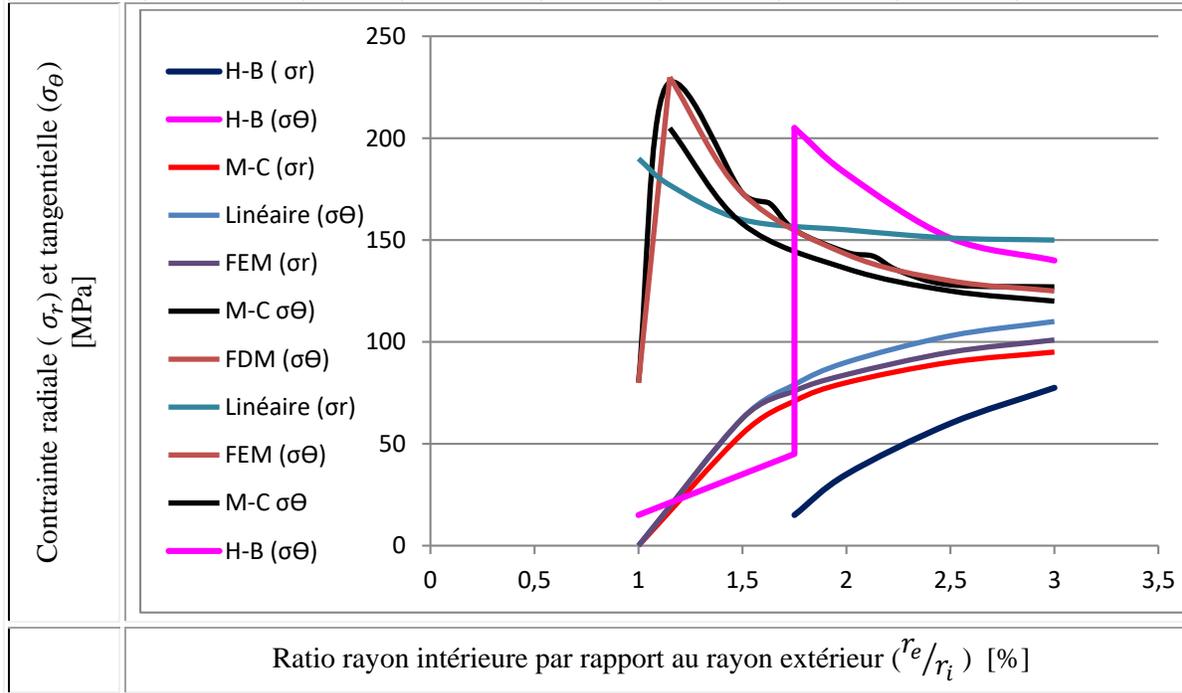


Figure 8.8 : La tendance des contraintes radiales et tangentielles - La contrainte hydrostatique ( $\sigma_1 = \sigma_3$ ) annule tous les termes en  $\theta$  et donne exactement les mêmes expressions que celles de Lamé. Les modèles de résistance de Mohr-Coulomb modifiés par *Hoek-Brown (1986)* et *Montès (2013)* sont utilisés comme critères de rupture aux fins de statuer sur l'état de stabilité des galeries souterraines .

## CONCLUSION GÉNÉRALE

La conception des infrastructures dans les massifs rocheux par modélisation numérique est un sujet fort complexe, mais pertinent dans le contexte des aspects liés à la sécurité et à la pérennité des opérations. Les massifs rocheux sont des matériaux naturels dont les propriétés géomécaniques sont incontrôlables. Attendu le grand nombre d'essais requis, le recours aux abaques<sup>66</sup> pour avoir des données et des résultats manquants acceptables est essentiel.

L'objectif d'étudier la pétrogenèse des zones de confinement des galeries souterraines soumises aux contraintes naturelles et induites et de prévoir les déformations différées des cavités avant et après excavation du massif rocheux est globalement atteint. Les objectifs spécifiques sont atteints lesquels consistent à : a) systématiser le problème en tenant compte des interactions structurales; b) développer un modèle rhéologique de prédiction qui tient compte du comportement différé des galeries confinées puis statuer sur l'état de stabilité des galeries de mines souterraines (Mémé et Casséus) endommagées; c) déterminer la zone d'influence de l'excavation et analyser le phénomène de fluage pour aboutir à une méthodologie permettant de prendre en compte les implications dans le calcul à long terme des revêtements de tunnels en Haïti.

Une approche systémique est adoptée pour résoudre le problème pratique dans le cadre des gisements à l'étude. Un système physique simplifié équivalent remplace le système non linéaire en vue de décrire la réalité géotechnique complexe. Les approches de traitement de données du modèle différé par simulation numérique avec application à la mine Sedren de Terre Neuve à Haïti permettent de déterminer la zone d'influence de l'excavation; de statuer sur la stabilité des galeries souterraines et des besoins en soutènement des excavations.

Les méthodologies sont élaborées pour l'analyse de stabilité du système (galeries minières) par modélisation numérique avec application à la mine Sedren de Terre Neuve à Haïti et permettent de déterminer la zone de confinement des excavations. Si l'on exclut les études qui peuvent être traités par des méthodes analytiques simples (cavités en milieu homogène), le recours aux codes

---

<sup>66</sup> Voir Annexe E.

EXAMINE<sub>2D</sub>, PLAXIS<sub>2D</sub> et FLAC<sub>2D</sub> s'avère nécessaire dans les cas suivants : a) Influence d'une galerie souterraine sur son environnement. b) Interaction massif rocheux-structure. c) Lois de comportement (anisotropie, élasto-viscoplasticité). d) Rhéologie des matériaux. e) Écoulement de l'eau. f) État spatio-temporel du modèle. g) Phasages de construction du tunnel.

Quant à l'applicabilité des résultats attendus, le nouveau modèle rhéologique proposé, de type numérique a toute son importance. L'approche de modélisation ne demande pas beaucoup de ressources importantes. Les raisons sont multiples : a) La modélisation rhéologique contributive permet de définir globalement l'instabilité et la déformabilité d'un site minier. Les simulations numériques avec PLAXIS<sub>2D</sub> et FLAC<sub>2D</sub> quantifient ces deux paramètres. b) Le cas d'instabilité par écrouissage structural de rupture due à l'excès de contraintes induites est traité. Le modèle viscoplastique optimise la durabilité des ouvrages miniers et élimine à la source les dangers géomécaniques fréquents dans le secteur minier. c) L'applicabilité de ce modèle différé sur l'ouvrage réel s'effectue avec la confrontation entre les calculs numériques et les mesures in situ réalisées sur les galeries minières. Les prises en compte des différents intrants dans l'analyse du cas à l'étude fournit de l'envergure à la thèse, du comportement élasto-viscoplastique aux fins d'analyse et de l'adaptation du modèle CVISC analogue au modèle développé bonifient en termes de contributions et d'originalité. Certes, trois contributions peuvent être notées :

a) Élaboration approfondie d'un système géomécanique simple sous l'effet d'un terrain confiné qui tient compte des perturbations essentielles. L'étude est orientée selon l'approche systémique de l'évolution des impacts de contraintes naturelles et induites sur l'état de stabilité des galeries minières. Le travail est fort complexe et pertinent dans le contexte des aspects liés à la sécurité de ces infrastructures en cours et suivant leur exploitation.

b) La méthode d'analyse fondée avec PLAXIS<sub>2D</sub> et FLAC<sub>2D</sub> permet de simuler le modèle développé adapté aux massifs rocheux sous l'effet d'un terrain confiné en vue de statuer quant à la stabilité d'infrastructure rocheuse faisant l'objet d'une exploitation minière. En outre, l'approche d'analyse modale afin d'obtenir un modèle de variables d'état avec Matlab dans la thèse a toute son importance. L'hybridation de plusieurs approches (Lagrange et Newton) à l'ultime but d'obtenir des réponses (réceptances, déplacements, déformations, zone d'influence) valides est reliée à la recherche contributive. Ce nouveau procédé permet de valider l'adéquation du modèle développé avant toute simulation de prédiction de relaxation des galeries.

c) L'approfondissement des méthodes de modélisations différées pour effectuer des calculs de simulations numériques fondées sur l'application des FEM et des FDM . La stratégie opérationnelle de quatre étapes est utilisée pour atteindre le but visé . Soient : l'observation sur le terrain (de la dislocation de la matrice rocheuse jusqu'au constat de rupture); l'analyse mathématique exacte; la modélisation analogique et la modélisation numérique.

Quant aux limites de la recherche, les analyses ont été limitées en milieu homogène dans l'étude de l'influence du temps et de l'espace. Notre approche permet de simplifier les calculs et de mieux saisir l'influence de la durée des opérations. Lorsque les roches encaissantes s'endommagent, le module de Young (E) et le coefficient de Poisson ( $\nu$ ) devraient subir des variations qui vont affecter le processus. Dans les analyses présentées, les paramètres viscoplastiques des roches intactes ont été utilisés en tout temps. Cette simplification a permis de faire des gains en temps de calcul. D'autres perspectives de recherche telles la liquéfaction due à la sismicité du massif rocheux, les galeries souterraines creusées dans des terrains multicouches, l'interaction entre les ouvrages sont recommandées. L'utilisation d'un logiciel de milieu continu pour analyser des ruptures en tension et en cisaillement a ses limites. Pour les acteurs du secteur concerné, il est urgent de restaurer techniquement le site. Nous proposons comme actions :

- de contribuer à la résolution de problèmes ciblant les dangers dans le secteur minier (éboulements, glissements, effondrements etc.).
- de minimiser l'impact environnemental de l'exploitation des ressources minières;
- de contribuer à la prévention durable des problèmes de santé et sécurité au travail.

La thèse va permettre la prise en charge par un quelconque organisme reponsable de santé et de sécurité au travail qui s'inscrit dans la volonté institutionnelle d'approches de développement et la prévention durable des problèmes des travailleurs de mines vulnérables aux lésions dues aux accidents de travail. De façon générale, elle apporte un éclairage au développement d'un modèle qui tient compte des activités d'excavation, de tectonique, ajoutées au confinement. Finalement, les gains réels et immédiats sont :

- le développement d'une expertise qui convient au contexte local;
- l'établissement de barèmes d'application;
- la connaissance des problèmes d'instabilité pour les atténuer;
- l'atteinte de l'acceptabilité sociale et l'harmonie des approches intégrées.



**ANNEXE A**  
**CARTE MORPHOLOGIQUE DE LA PRESQU'ÎLE D'HAÏTI**

**LE MASSIF DE TERRE-NEUVE**

a) Cadre géographique

L'ensemble est composé d'un alignement sur 200 kilomètres de plusieurs massifs montagneux situés pour la plupart en territoire haïtien. Du côté dominicain, il se confond avec la Sierra de Neiba qui sert également de prolongement à la chaîne des Matheux. Les altitudes observées sont modestes (< 100 m) sauf dans les Montagnes Noires avec le pic Bonhomme à 1780 m.

b) Cadre géologique

Le socle Crétacé retrouvé dans la partie nord-ouest de l'ensemble est similaire à la série d'arc du massif du Nord et sa couverture carbonatée paléogène. Cette dernière est suivie par une épaisse série volca-sédimentaire andésitique qu'on retrouve dans les Montagnes Noires et dans la presqu'île du Nord-Ouest.



Légende relative au massif de Terre Neuve du Département de l'Artibonite (tache en rouge)

### Roches sédimentaires

#### CRETACE ET TERTIAIRE

Pl

**Maestrichien à Danien:** marnes et calcaires marneux du Massif de la Selle (fm. Beloc); argiles et roches volcano détritiques du Massif de la Hotte (fm. Rivière Glace); ailleurs, calcaires pélagiques de la Presqu'île du Sud.

#### CRETACE

Cf

**Sénonien supérieur:** dépôts essentiellement terrigènes (ardoises et flyschs de la formation Trois Rivières); conglomérats et calcaires de plate-forme du Morne du Cap et du Bonnet-à l'Évêque.

Cs

**Sénonien:** calcaires pélagiques de la Presqu'île du Sud (fm. Macaya) et du Massif de Terre Neuve (fm. Miguinda), et autres calcaires du même âge.

Cc

**Crétacé inférieur à moyen:** calcarénites et marnes rouges de la Presqu'île du Sud.

#### Signes conventionnels

 failles observées

 failles supposés

 sens du coulissement

 chevauchement

 contact stratigraphique normal (observé ou supposé)

 contact stratigraphique anormal supposé

 pendage

 cône d'épandage alluvial

 terrasse d'abrasion marine

### Roches magmatiques

#### PLIO-QUATERNAIRE

βpa

basaltes néphéliniques du Morne La Vigie et de Thomazeau

#### TERTIAIRE

βm

**Miocène moyen:** basaltes alcalins de la Chaîne des Matheux (lieux-dits de Cazale et de Couyau) et Presqu'île du Nord-Ouest

βe

**Paléocène supérieur, Eocène inférieur à moyen:** basaltes de la Presqu'île du Nord-Ouest et du massif du Nord: série volcano-sédimentaire des Montagnes Noires (fm. Pérodin); (Ev) basaltes à dacites de la partie Ouest du Massif du Macaya (βe).

#### CRETACE

Gd

Tonalites, diorites quartziques et granodiorites du Massif du Nord, du Massif de Terre-Neuve et de la Presqu'île du Nord-Ouest.

a

Andésites basiques, andésites, dacites et rhyodacites calco-alcalines du Massif du Nord, du Massif de Terre-Neuve et de la Presqu'île du Nord-Ouest.

Cs

Série à blocs de la route de Jacmel.

Cb

Complexe tholéitique et sédimentaire de Presqu'île du Sud (fm. Dumisseau) et autres coulées massives, avec ou sans intercalations sédimentaires.

μ

Amphibolites et roches ultra-basiques, métagabbros crétacés ou plus anciens du massif du Nord.





**ANNEXE B**  
**ILLUSTRATION DU CADRE ENVIRONNEMENTAL D'HAÏTI :**  
**LA PLAQUE CARAÏBE**

La plaque caraïbe est une plaque tectonique. Sa superficie est de 0,07304 stéradians<sup>67</sup>. Elle couvre : la majeure partie de la mer des Caraïbes et les îles de la Jamaïque, d'Hispaniola, de Porto Rico et des petites Antilles ; le Honduras, le Salvador, le Nicaragua et le Nord du Costa Rica. La plaque caraïbe est en contact avec les plaques de Panama, des Andes du Nord, sud-américaine, nord-américaine et de Cocos. Ses frontières avec les autres plaques sont notamment formées des fosses de subduction d'Amérique centrale sur la côte Pacifique du Nicaragua et du Salvador et Caraïbes sur la côte est des Antilles. Selon Boisson (1987), « *La plaque caraïbe se déplace vers le nord-est à une vitesse de 2,45 centimètres par an ou encore à une vitesse de rotation de 0,904° par million d'années selon un pôle eulérien situé à 54°31' de latitude nord et 79°43' de longitude ouest (référentiel : plaque pacifique)* ».

La frontière de la plaque Nord Caraïbe est une région en collision oblique qui sépare la plaque Nord d'Amérique de la plaque Caraïbe. Cette frontière de plaque connaît une sismicité importante dont le dernier exemple en date est le séisme meurtrier du 12 Janvier 2010 de magnitude 7. Selon Corbeau (2015), « *Dans la région d'Haïti, la transpression qui en résulte s'exprime par un partitionnement de la déformation entre d'une part deux failles décrochantes majeures et d'autre part des chevauchements. Cette frontière de plaque connaît une sismicité importante* ».

---

<sup>67</sup> L'unité d'angle solide est le stéradian, angle solide d'un cône qui, ayant son sommet au centre d'une sphère, découpe sur la surface de cette sphère une aire égale à celle d'un carré ayant pour côté une longueur égale au rayon de la sphère.



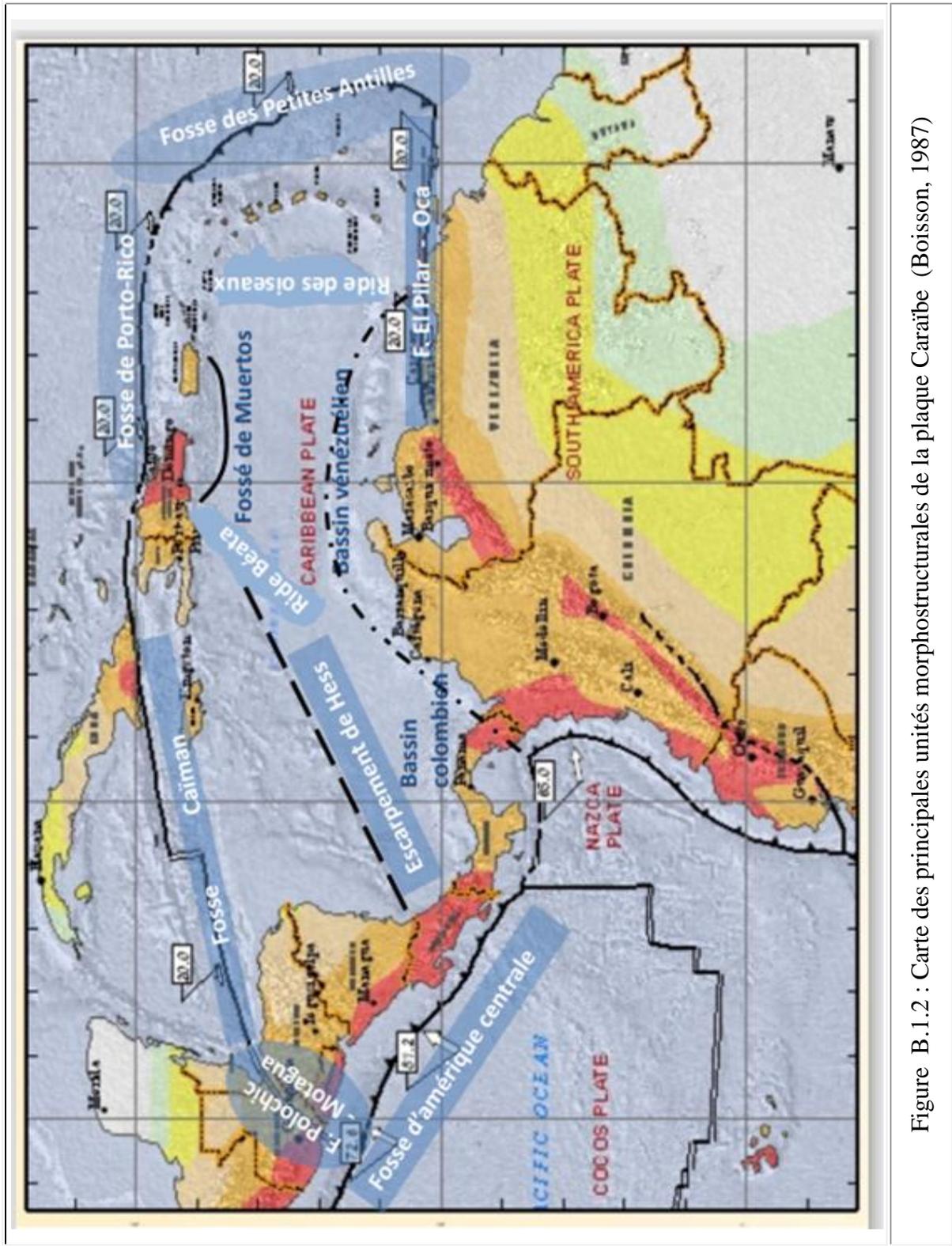


Figure B.1.2 : Carte des principales unités morphostructurales de la plaque Caraïbe (Boisson, 1987)



## ANNEXE C

### CADRE DE DÉTECTION DES DÉFAILLANCES DE CAVITÉS SOUTERRAINES PAR SURVEILLANCE VIBRATOIRE

Le 12 janvier 2010, la capitale d'Haïti, Port-au-Prince, a été détruite par un très violent séisme. Ce séisme meurtrier de magnitude 7 près de Port-au-Prince a mis en évidence l'importance de la transpression dans cette zone. En 2011, afin de mieux prendre en compte le risque sismique dans la reconstruction et le développement de la capitale, une étude de microzonage sismique sur Port-au-Prince a été programmée entre le PNUD, l'État haïtien (LNBTP et BME) et le BRGM. Les connaissances géologiques et topographiques locales constituent des préalables essentiels dans le processus de réalisation d'un microzonage. L'étude géologique montre un substratum Miocène à Pliocène principalement composé de carbonates fortement remobilisés (turbidites, coulées de débris) résultant de l'érosion de la montagne de La Selle située au Sud et à la mise en place d'un bassin propageant dans la plaine du Cul-de-Sac au Nord. Voir Figure C.1.

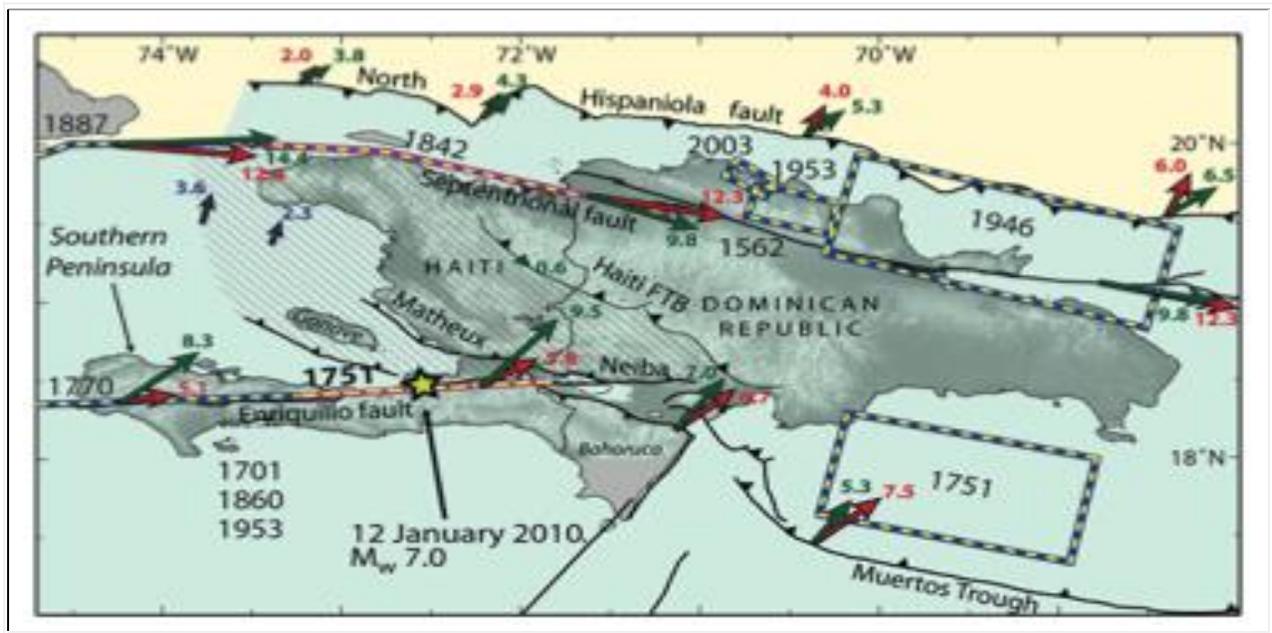


Figure C.1 : Histoire des principaux séismes de 1564 à 1907. D'après Dolan et Wald (1998) et McCann (2006). Estimations de vitesses sismographiques réalisées à partir de mesures GPS de l'étude de Calais et al. (2010) (vecteurs rouges) avec les estimations de l'étude de Benford et al. (2012b) (vecteurs verts) de la presqu'île d'Haïti.



**ANNEXE D**  
**SYNTHÈSE DES TRAVAUX DE PROSPECTION**  
**& DES ACTIVITÉS DE RECONNAISSANCE**

**D.1 LOCALISATION DU RÉSEAU DE LIGNES**

Le réseau a été schématisé grâce aux données recueillies à la boussole et à la chaîne. Toutes les lignes sont marquées sur le terrain par des piquets posés à un intervalle de 25 m et sur lesquels les stations sont identifiées. La ligne de base a une longueur totale de 10 600 mètres. Les lignes transversales sont espacées de 100 mètres. Leur longueur, du côté Nord-Est et Sud-Ouest de la ligne de base, atteint respectivement une longueur maximum de 3 000 mètres et 2 600 mètres. Afin de localiser le réseau, les lignes ont été positionnées par GPS, relativement à la grille UTM par rapport à la station de base établie à Terre Neuve. La position absolue de la station de base a été obtenue par la moyenne d'une quantité de lectures prises durant une période de six heures. Les lectures prises à chacun des points de rattachement du réseau ont été synchronisées avec les lectures de la station de base afin de compenser l'erreur systématique commise.

**D.2 SONDAGES & LEVÉS LITHORADIOMÉTRIQUES**

Les lectures de radiométrie ont été prises le long des lignes transversales à un intervalle de 12.5 mètres. L'instrument utilisé est un scintillomètre de modèle Scintrex BGS-1SL qui couvre l'ensemble du spectre de rayonnement gamma. Les unités de mesure sont exprimées en scintillements par seconde (counts per second / cps). Les lectures ont été prises à une hauteur d'environ 60 centimètres du sol. Un total de 12 900 lectures de radiométrie ont été prises couvrant ainsi plus de 160 kilomètres de lignes. La valeur minimale est de 12 cps; la maximale de 100 cps. Et ce qui fait une moyenne de 40 cps. Les résultats des levés de radiométrie sont illustrés à la planche D.2.1

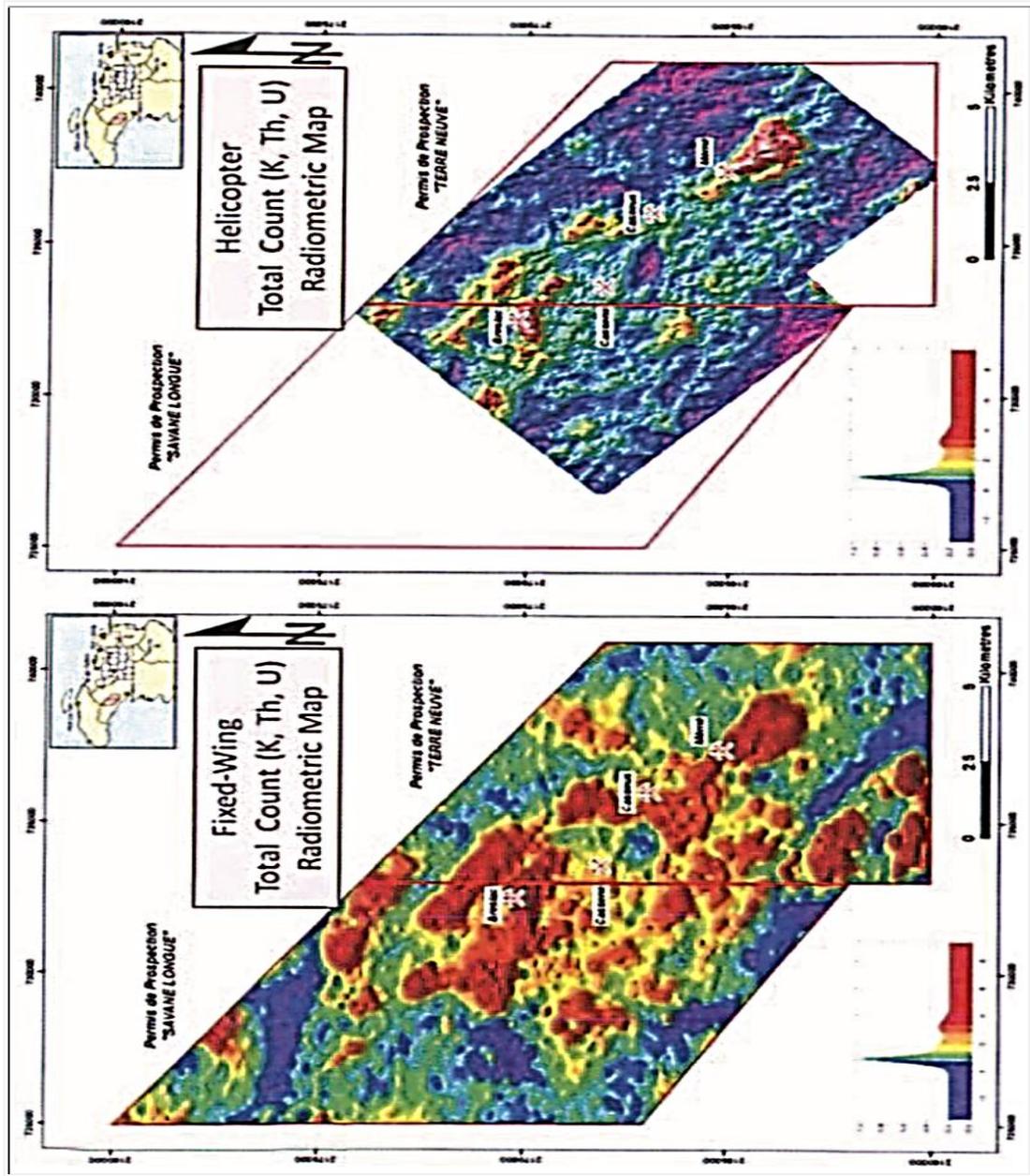


Figure D.2.1 : Cartes radiométriques (comptage total K, Th et U) réduites à voiture fixe (à gauche) et hélicopté (à droite) couvrant les secteurs de Terre Neuve et de Savanne Longue. (Marien mining, 2011) – Certaines unités lithologiques telles les calcaires et d’autres roches intrusives peuvent être caractériser puisque leurs niveaux de radioactivité sont supérieurs à la moyenne. Il est à remarquer : aucune corrélation n’est observable entre la minéralisation et la radioactivité.

<b>SODEMINE, S.A.</b>						Ligne
<b>Levés radiométriques de la région de Terre Neuve</b>						N°: 0-S ( 1 / 1)
Station (m)	Lecture (cps)	Station (m)	Lecture (cps)	Station (m)	Lecture (cps)	Validation des données
<b>0000.0 - N</b>	<b>30</b>	<b>0250.0 - N</b>	<b>16</b>	<b>0500.0 - N</b>	N/A	
0012.5 - N	34	062.5 - N	16	0512.5 - N	N/A	
<b>0025.0 - N</b>	<b>34</b>	<b>0275.0 - N</b>	<b>16</b>	<b>0525.0 - N</b>	N/A	
0.037.5 - N	38	0.287.5 - N	18	0.537.5 - N	N/A	
<b>0050.0 - N</b>	<b>34</b>	<b>0300.0 - N</b>	<b>20</b>	<b>0550.0 - N</b>	N/A	
0062.5 - N	34	0312.5 - N	22	0662.5 - N	N/A	
<b>0075.0 - N</b>	<b>38</b>	<b>0325.0 - N</b>	<b>22</b>	<b>0575.0 - N</b>	N/A	
0087.5 - N	34	0337.5 - N	18	0587.5 - N	N/A	
<b>0100.0 - N</b>	<b>32</b>	<b>0350.0 - N</b>	<b>16</b>	<b>0600.0 - N</b>	N/A	
0112.5 - N	34	0362.5 - N	16	0612.5 - N	N/A	
<b>0125.0 - N</b>	<b>34</b>	<b>0375.0 - N</b>	<b>18</b>	<b>0625.0 - N</b>	N/A	
0137.5 - N	36	0387.5 - N	16	0637.5 - N	N/A	
<b>0150.0 - N</b>	<b>32</b>	<b>0400.0 - N</b>	<b>16</b>	<b>0650.0 - N</b>	N/A	
0162.5 - N	32	0412.5 - N	16	0662.5 - N	N/A	
<b>0175.0 - N</b>	<b>26</b>	<b>0425.0 - N</b>	<b>18</b>	<b>0675.0 - N</b>	N/A	
0187.5 - N	28	0437.5 - N	16	0687.5 - N	N/A	
<b>0200.0 - N</b>	<b>28</b>	<b>0450.0 - N</b>	<b>18</b>	<b>0700.0 - N</b>	N/A	
0212.5 - N	20	0462.5 - N	14	0712.5 - N	N/A	
<b>0225.0 - N</b>	<b>18</b>	<b>0475.0 - N</b>	<b>16</b>	<b>0725.0 - N</b>	N/A	
0237.5 - N	16	0487.5 - N	N/A	0737.5 - N	N/A	
<b>0250.0 - N</b>	<b>16</b>	<b>0500.0 - N</b>	N/A	<b>0750.0 - N</b>	N/A	
<b>Note :</b> L'enregistrement des données est fait avec un instrument de marque Scintrex BGS-1SL. L'unité de mesure est le <b>cps</b> qui signifie <b>scintillement / seconde.</b>						Date: 2018
Liens avec fiche N° : <b>Aucun</b>						
Fiche complétée par : Valentino Nelson & William Colas						

<b>SODEMINE, S.A.</b>						<b>Ligne</b>
<b>Levés radiométriques de la région de Terre Neuve</b>						<b>N°: 0 - N</b> <b>( 1 / 2 )</b>
<b>Station (m)</b>	<b>Lecture (cps)</b>	<b>Station (m)</b>	<b>Lecture (cps)</b>	<b>Station (m)</b>	<b>Lecture (cps)</b>	<b>Validation des données</b>
<b>0000.0 - N</b>	<b>30</b>	<b>0250.0 - N</b>	<b>24</b>	<b>0500.0 - N</b>	<b>54</b>	
0012.5 - N	40	062.5 - N	30	0512.5 - N	58	
<b>0025.0 - N</b>	<b>38</b>	<b>0275.0 - N</b>	<b>38</b>	<b>0525.0 - N</b>	<b>60</b>	
0.037.5 - N	34	0.287.5 - N	32	0.537.5 - N	70	
<b>0050.0 - N</b>	<b>32</b>	<b>0300.0 - N</b>	<b>22</b>	<b>0550.0 - N</b>	<b>70</b>	
0062.5 - N	30	0312.5 - N	24	0662.5 - N	70	
<b>0075.0 - N</b>	<b>32</b>	<b>0325.0 - N</b>	<b>30</b>	<b>0575.0 - N</b>	<b>62</b>	
0087.5 - N	34	0337.5 - N	32	0587.5 - N	62	
<b>0100.0 - N</b>	<b>30</b>	<b>0350.0 - N</b>	<b>38</b>	<b>0600.0 - N</b>	<b>72</b>	
0112.5 - N	32	0362.5 - N	40	0612.5 - N	68	
<b>0125.0 - N</b>	<b>28</b>	<b>0375.0 - N</b>	<b>40</b>	<b>0625.0 - N</b>	<b>68</b>	
0137.5 - N	28	0387.5 - N	38	0637.5 - N	64	
<b>0150.0 - N</b>	<b>34</b>	<b>0400.0 - N</b>	<b>40</b>	<b>0650.0 - N</b>	<b>62</b>	
0162.5 - N	38	0412.5 - N	40	0662.5 - N	62	
<b>0175.0 - N</b>	<b>28</b>	<b>0425.0 - N</b>	<b>40</b>	<b>0675.0 - N</b>	<b>60</b>	
0187.5 - N	30	0437.5 - N	42	0687.5 - N	62	
<b>0200.0 - N</b>	<b>34</b>	<b>0450.0 - N</b>	<b>40</b>	<b>0700.0 - N</b>	<b>58</b>	
0212.5 - N	30	0462.5 - N	42	0712.5 - N	58	
<b>0225.0 - N</b>	<b>28</b>	<b>0475.0 - N</b>	<b>50</b>	<b>0725.0 - N</b>	<b>54</b>	
0237.5 - N	30	0487.5 - N	42	0737.5 - N	56	
<b>0250.0 - N</b>	<b>24</b>	<b>0500.0 - N</b>	<b>54</b>	<b>0750.0 - N</b>	<b>50</b>	
<b>Note :</b> L'enregistrement des données est fait avec un instrument de marque Scintrex BGS-ISL. L'unité de mesure est le <b>cps</b> qui signifie <b>scintillement / seconde.</b>						Date: 2018
Liens avec fiche N° : 0 - N ( 2 / 2 )						
Fiche complétée par : Valentino Nelson & William Colas						

<b>SODEMINE, S.A.</b>						<b>Ligne</b>	
<b>Levés radiométriques de la région de Terre Neuve</b>						<b>N°:1 –W ( 1 / 2)</b>	
Station (m)	Lecture (cps)	Station (m)	Lecture (cps)	Station (m)	Lecture (cps)	Validation des données	
<b>0000.0 - N</b>	<b>36</b>	<b>0250.0 – N</b>	<b>30</b>	<b>0500.0 - N</b>	<b>30</b>		
0012.5 - N	30	062.5 – N	32	0512.5 - N	36		
<b>0025.0 - N</b>	<b>36</b>	<b>0275.0 – N</b>	<b>38</b>	<b>0525.0 - N</b>	<b>36</b>		
0.037.5 - N	36	0.287.5 – N	30	0.537.5 - N	38		
<b>0050.0 - N</b>	<b>38</b>	<b>0300.0 – N</b>	<b>32</b>	<b>0550.0 - N</b>	<b>42</b>		
0062.5 - N	32	0312.5 – N	38	0662.5 - N	40		
<b>0075.0 - N</b>	<b>34</b>	<b>0325.0 – N</b>	<b>34</b>	<b>0575.0 - N</b>	<b>40</b>		
0087.5 - N	30	0337.5 – N	32	0587.5 - N	38		
<b>0100.0 - N</b>	<b>36</b>	<b>0350.0 – N</b>	<b>34</b>	<b>0600.0 - N</b>	<b>46</b>		
0112.5 - N	32	0362.5 – N	28	0612.5 - N	60		
<b>0125.0 - N</b>	<b>36</b>	<b>0375.0 – N</b>	<b>30</b>	<b>0625.0 - N</b>	<b>64</b>		
0137.5 - N	28	0387.5 – N	30	0637.5 - N	70		
<b>0150.0 - N</b>	<b>34</b>	<b>0400.0 – N</b>	<b>28</b>	<b>0650.0 - N</b>	<b>64</b>		
0162.5 - N	32	0412.5 – N	30	0662.5 - N	60		
<b>0175.0 - N</b>	<b>30</b>	<b>0425.0 – N</b>	<b>40</b>	<b>0675.0 - N</b>	<b>64</b>		
0187.5 - N	22	0437.5 – N	38	0687.5 - N	60		
<b>0200.0 - N</b>	<b>30</b>	<b>0450.0 – N</b>	<b>40</b>	<b>0700.0 - N</b>	<b>62</b>		
0212.5 - N	22	0462.5 – N	38	0712.5 - N	62		
<b>0225.0 - N</b>	<b>32</b>	<b>0475.0 – N</b>	<b>40</b>	<b>0725.0 - N</b>	<b>62</b>		
0237.5 - N	34	0487.5 – N	36	0737.5 - N	70		
<b>0250.0 - N</b>	<b>30</b>	<b>0500.0 – N</b>	<b>30</b>	<b>0750.0 - N</b>	<b>70</b>		
<b>Note :</b> L'enregistrement des données est fait avec un instrument de marque Scintrex BGS-1SL. L'unité de mesure est le <b>cps</b> qui signifie <b>scintillement / seconde.</b>							Date: 2018
Liens avec fiche N° : 1 –W ( 2 / 2)							
Fiche complétée par : Valentino Nelson & William Colas							

<b>SODEMINE, S.A.</b>						<b>Ligne</b>
<b>Levés radiométriques de la région de Terre Neuve</b>						<b>N°:1 –W</b> <b>( 2 / 2 )</b>
<b>Station (m)</b>	<b>Lecture (cps)</b>	<b>Station (m)</b>	<b>Lecture (cps)</b>	<b>Station (m)</b>	<b>Lecture (cps)</b>	<b>Validation des données</b>
<b>0750.0 - N</b>	<b>70</b>	<b>1000.0 - N</b>	<b>60</b>	<b>1250.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0762.5 - N	54	1012.5 - N	56	1262.5 - N	N/A	
<b>0775.0 - N</b>	<b>60</b>	<b>1025.0 - N</b>	<b>56</b>	<b>1275.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0787.5 - N	62	1037.5 - N	58	1.287.5 - N	N/A	
<b>0800.0 - N</b>	<b>60</b>	<b>1050.0 - N</b>	<b>60</b>	<b>1300.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0812.5 - N	68	1062.5 - N	50	1312.5 - N	N/A	
<b>0825.0 - N</b>	<b>58</b>	<b>1075.0 - N</b>	<b>52</b>	<b>1325.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0837.5 - N	54	1087.5 - N	48	1337.5 - N	N/A	
<b>0850.0 - N</b>	<b>52</b>	<b>1100.0 - N</b>	<b>52</b>	<b>1350.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0862.5 - N	50	1112.5 - N	48	1362.5 - N	N/A	
<b>0875.0 - N</b>	<b>48</b>	<b>1125.0 - N</b>	<b>56</b>	<b>1375.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0887.5 - N	50	1137.5 - N	60	1387.5 - N	N/A	
<b>0900.0 - N</b>	<b>52</b>	<b>1150.0 - N</b>	<b>58</b>	<b>1400.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0912.5 - N	54	1162.5 - N	58	1412.5 - N	N/A	
<b>0925.0 - N</b>	<b>48</b>	<b>1175.0 - N</b>	<b>52</b>	<b>1425.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0937.5 - N	50	1187.5 - N	60	1437.5 - N	N/A	
<b>0950.0 - N</b>	<b>46</b>	<b>1200.0 - N</b>	<b>60</b>	<b>1450.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0962.5 - N	52	1212.5 - N	58	1462.5 - N	N/A	
<b>0975.0 - N</b>	<b>52</b>	<b>1225.0 - N</b>	<b>50</b>	<b>1475.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0987.5 - N	56	1237.5 - N	N/A	1487.5 - N	N/A	
<b>1000.0 - N</b>	<b>60</b>	<b>1250.0 - N</b>	<b>N/A</b>	<b>1500.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
<b>Note :</b> L'enregistrement des données est fait avec un instrument de marque Scintrex BGS-ISL. L'unité de mesure est le <b>cps</b> qui signifie <b>scintillement / seconde.</b>						Date: 2018
Liens avec fiche N° : 1 –W ( 1 / 2 )						
Fiche complétée par : Valentino Nelson & William Colas						

SODEMINE, S.A.						Ligne
Levés radiométriques de la région de Terre Neuve						N°: 1 –E ( 1 / 2)
Station (m)	Lecture (cps)	Station (m)	Lecture (cps)	Station (m)	Lecture (cps)	Validation des données
<b>0000.0 - N</b>	<b>40</b>	<b>0250.0 - N</b>	<b>26</b>	<b>0500.0 - N</b>	<b>60</b>	
0012.5 - N	30	062.5 - N	30	0512.5 - N	62	
<b>0025.0 - N</b>	<b>28</b>	<b>0275.0 - N</b>	<b>26</b>	<b>0525.0 - N</b>	<b>62</b>	
0.037.5 - N	32	0.287.5 - N	32	0.537.5 - N	64	
<b>0050.0 - N</b>	<b>32</b>	<b>0300.0 - N</b>	<b>30</b>	<b>0550.0 - N</b>	<b>66</b>	
0062.5 - N	28	0312.5 - N	30	0662.5 - N	66	
<b>0075.0 - N</b>	<b>30</b>	<b>0325.0 - N</b>	<b>28</b>	<b>0575.0 - N</b>	<b>68</b>	
0087.5 - N	36	0337.5 - N	34	0587.5 - N	68	
<b>0100.0 - N</b>	<b>28</b>	<b>0350.0 - N</b>	<b>32</b>	<b>0600.0 - N</b>	<b>46</b>	
0112.5 - N	30	0362.5 - N	30	0612.5 - N	66	
<b>0125.0 - N</b>	<b>30</b>	<b>0375.0 - N</b>	<b>38</b>	<b>0625.0 - N</b>	<b>64</b>	
0137.5 - N	28	0387.5 - N	32	0637.5 - N	60	
<b>0150.0 - N</b>	<b>28</b>	<b>0400.0 - N</b>	<b>38</b>	<b>0650.0 - N</b>	<b>62</b>	
0162.5 - N	28	0412.5 - N	54	0662.5 - N	54	
<b>0175.0 - N</b>	<b>26</b>	<b>0425.0 - N</b>	<b>58</b>	<b>0675.0 - N</b>	<b>56</b>	
0187.5 - N	30	0437.5 - N	60	0687.5 - N	50	
<b>0200.0 - N</b>	<b>22</b>	<b>0450.0 - N</b>	<b>64</b>	<b>0700.0 - N</b>	<b>48</b>	
0212.5 - N	26	0462.5 - N	62	0712.5 - N	48	
<b>0225.0 - N</b>	<b>26</b>	<b>0475.0 - N</b>	<b>64</b>	<b>0725.0 - N</b>	<b>50</b>	
0237.5 - N	28	0487.5 - N	64	0737.5 - N	42	
<b>0250.0 - N</b>	<b>26</b>	<b>0500.0 - N</b>	<b>60</b>	<b>0750.0 - N</b>	<b>44</b>	
<b>Note :</b> L'enregistrement des données est fait avec un instrument de marque Scintrex BGS-ISL. L'unité de mesure est le <b>cps</b> qui signifie <b>scintillement / seconde.</b>						Date: 2018
Liens avec fiche N° : 1 –E ( 2 / 2)						
Fiche complétée par : Valentino Nelson & William Colas						

<b>SODEMINE, S.A.</b>						<b>Ligne</b>
<b>Levés radiométriques de la région de Terre Neuve</b>						<b>N°: 1 –E</b> <b>( 2 / 2 )</b>
<b>Station (m)</b>	<b>Lecture (cps)</b>	<b>Station (m)</b>	<b>Lecture (cps)</b>	<b>Station (m)</b>	<b>Lecture (cps)</b>	<b>Validation des données</b>
<b>0750.0 - N</b>	<b>44</b>	<b>1000.0 – N</b>	<b>52</b>	<b>1250.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0762.5 - N	48	1012.5 – N	50	1262.5 - N	<b>N/A</b>	
<b>0775.0 - N</b>	<b>56</b>	<b>1025.0 – N</b>	<b>48</b>	<b>1275.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0787.5 - N	56	1037.5 – N	46	1.287.5 - N	<b>N/A</b>	
<b>0800.0 - N</b>	<b>52</b>	<b>1050.0 – N</b>	<b>48</b>	<b>1300.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0812.5 - N	42	1062.5 – N	50	1312.5 - N	<b>N/A</b>	
<b>0825.0 - N</b>	<b>58</b>	<b>1075.0 – N</b>	<b>46</b>	<b>1325.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0837.5 - N	46	1087.5 – N	44	1337.5 - N	<b>N/A</b>	
<b>0850.0 - N</b>	<b>46</b>	<b>1100.0 – N</b>	<b>40</b>	<b>1350.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0862.5 - N	44	1112.5 – N	42	1362.5 - N	<b>N/A</b>	
<b>0875.0 - N</b>	<b>40</b>	<b>1125.0 – N</b>	<b>42</b>	<b>1375.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0887.5 - N	42	1137.5 – N	44	1387.5 - N	<b>N/A</b>	
<b>0900.0 - N</b>	<b>52</b>	<b>1150.0 – N</b>	<b>50</b>	<b>1400.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0912.5 - N	52	1162.5 – N	52	1412.5 - N	<b>N/A</b>	
<b>0925.0 - N</b>	<b>50</b>	<b>1175.0 – N</b>	<b>52</b>	<b>1425.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0937.5 - N	50	1187.5 – N	40	1437.5 - N	<b>N/A</b>	
<b>0950.0 - N</b>	<b>56</b>	<b>1200.0 – N</b>	<b>42</b>	<b>1450.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0962.5 - N	46	1212.5 – N	<b>N/A</b>	1462.5 - N	<b>N/A</b>	
<b>0975.0 - N</b>	<b>50</b>	<b>1225.0 – N</b>	<b>N/A</b>	<b>1475.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0987.5 - N	50	1237.5 – N	<b>N/A</b>	1487.5 - N	<b>N/A</b>	
<b>1000.0 - N</b>	<b>52</b>	<b>1250.0 – N</b>	<b>N/A</b>	<b>1500.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
<b>Note :</b> L'enregistrement des données est fait avec un magnétomètre de marque Scintrex BGS-ISL. L'unité de mesure est le <b>cps</b> qui signifie <b>scintillement / seconde.</b>						Date: 2018
Liens avec fiche N° : 1 –E ( 1 / 2 )						
Fiche complétée par : Valentino Nelson & William Colas						

<b>SODEMINE, S.A.</b>						<b>Ligne</b>
<b>Levés radiométriques de la région de Terre Neuve</b>						<b>N°: 2 –E</b> <b>( 1 / 2)</b>
<b>Station (m)</b>	<b>Lecture (cps)</b>	<b>Station (m)</b>	<b>Lecture (cps)</b>	<b>Station (m)</b>	<b>Lecture (cps)</b>	<b>Validation des données</b>
<b>0000.0 - N</b>	<b>32</b>	<b>0250.0 – N</b>	<b>38</b>	<b>0500.0 - N</b>	<b>64</b>	
0012.5 - N	34	062.5 – N	42	0512.5 - N	64	
<b>0025.0 - N</b>	<b>30</b>	<b>0275.0 – N</b>	<b>32</b>	<b>0525.0 - N</b>	<b>66</b>	
0.037.5 - N	30	0.287.5 –N	52	0.537.5 - N	66	
<b>0050.0 - N</b>	<b>38</b>	<b>0300.0 – N</b>	<b>54</b>	<b>0550.0 - N</b>	<b>68</b>	
0062.5 - N	36	0312.5 – N	50	0662.5 - N	62	
<b>0075.0 - N</b>	<b>34</b>	<b>0325.0 – N</b>	<b>40</b>	<b>0575.0 - N</b>	<b>62</b>	
0087.5 - N	24	0337.5 – N	60	0587.5 - N	62	
<b>0100.0 - N</b>	<b>34</b>	<b>0350.0 –N</b>	<b>60</b>	<b>0600.0 - N</b>	<b>60</b>	
0112.5 - N	32	0362.5 – N	60	0612.5 - N	60	
<b>0125.0 - N</b>	<b>34</b>	<b>0375.0 – N</b>	<b>64</b>	<b>0625.0 - N</b>	<b>58</b>	
0137.5 - N	30	0387.5 – N	64	0637.5 - N	56	
<b>0150.0 - N</b>	<b>34</b>	<b>0400.0 – N</b>	<b>62</b>	<b>0650.0 - N</b>	<b>56</b>	
0162.5 - N	36	0412.5 – N	64	0662.5 - N	44	
<b>0175.0 - N</b>	<b>32</b>	<b>0425.0 – N</b>	<b>66</b>	<b>0675.0 - N</b>	<b>44</b>	
0187.5 - N	28	0437.5 – N	62	0687.5 - N	50	
<b>0200.0 - N</b>	<b>32</b>	<b>0450.0 – N</b>	<b>64</b>	<b>0700.0 - N</b>	<b>54</b>	
0212.5 - N	30	0462.5 – N	66	0712.5 - N	50	
<b>0225.0 - N</b>	<b>36</b>	<b>0475.0 – N</b>	<b>66</b>	<b>0725.0 - N</b>	<b>52</b>	
0237.5 - N	38	0487.5 – N	62	0737.5 - N	50	
<b>0250.0 - N</b>	<b>38</b>	<b>0500.0 – N</b>	<b>64</b>	<b>0750.0 - N</b>	<b>52</b>	
<b>Note :</b> L'enregistrement des données est fait avec un magnétomètre de marque Scintrex BGS-1SL. L'unité de mesure est le <b>cps</b> qui signifie <b>scintillement / seconde.</b>						<b>Date:</b> 2018
Liens avec fiche N° : 2 –E ( 2 / 2)						
Fiche complétée par : Valentino Nelson & William Colas						

<b>SODEMINE, S.A.</b>						<b>Ligne</b>
<b>Levés radiométriques de la région de Terre Neuve</b>						<b>N°: 2 –E</b> <b>( 2 / 2 )</b>
Station (m)	Lecture (cps)	Station (m)	Lecture (cps)	Station (m)	Lecture (cps)	Validation des données
<b>0750.0 - N</b>	<b>52</b>	<b>1000.0 – N</b>	<b>42</b>	<b>1250.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0762.5 - N	54	1012.5 – N	56	1262.5 - N	<b>N/A</b>	
<b>0775.0 - N</b>	<b>54</b>	<b>1025.0 – N</b>	<b>56</b>	<b>1275.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0787.5 - N	60	1037.5 – N	54	1.287.5 - N	<b>N/A</b>	
<b>0800.0 - N</b>	<b>60</b>	<b>1050.0 – N</b>	<b>56</b>	<b>1300.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0812.5 - N	58	1062.5 – N	52	1312.5 - N	<b>N/A</b>	
<b>0825.0 - N</b>	<b>60</b>	<b>1075.0 – N</b>	<b>50</b>	<b>1325.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0837.5 - N	58	1087.5 – N	56	1337.5 - N	<b>N/A</b>	
<b>0850.0 - N</b>	<b>58</b>	<b>1100.0 –N</b>	<b>50</b>	<b>1350.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0862.5 - N	58	1112.5 – N	<b>N/A</b>	1362.5 - N	<b>N/A</b>	
<b>0875.0 - N</b>	<b>54</b>	<b>1125.0 – N</b>	<b>N/A</b>	<b>1375.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0887.5 - N	50	1137.5 – N	<b>N/A</b>	1387.5 - N	<b>N/A</b>	
<b>0900.0 - N</b>	<b>56</b>	<b>1150.0 – N</b>	<b>N/A</b>	<b>1400.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0912.5 - N	58	1162.5 – N	<b>N/A</b>	1412.5 - N	<b>N/A</b>	
<b>0925.0 - N</b>	<b>58</b>	<b>1175.0 – N</b>	<b>N/A</b>	<b>1425.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0937.5 - N	44	1187.5 – N	<b>N/A</b>	1437.5 - N	<b>N/A</b>	
<b>0950.0 - N</b>	<b>54</b>	<b>1200.0 – N</b>	<b>N/A</b>	<b>1450.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0962.5 - N	60	1212.5 – N	<b>N/A</b>	1462.5 - N	<b>N/A</b>	
<b>0975.0 - N</b>	<b>52</b>	<b>1225.0 – N</b>	<b>N/A</b>	<b>1475.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0987.5 - N	58	1237.5 – N	<b>N/A</b>	1487.5 - N	<b>N/A</b>	
<b>1000.0 - N</b>	<b>42</b>	<b>1250.0 – N</b>	<b>N/A</b>	<b>1500.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
<b>Note :</b> L'enregistrement des données est fait avec un magnétomètre de marque Scintrex BGS-ISL. L'unité de mesure est le <b>cps</b> qui signifie <b>scintillement / seconde.</b>						Date: 2018
Liens avec fiche N° : 2 –E ( 1 / 2 )						
Fiche complétée par : Valentino Nelson & William Colas						

SODEMINE, S.A.						Ligne
Levés radiométriques de la région de Terre Neuve						N°: 3 –E ( 1 / 2)
Station (m)	Lecture (cps)	Station (m)	Lecture (cps)	Station (m)	Lecture (cps)	Validation des données
0000.0 - N	34	0250.0 – N	60	0500.0 - N	32	
0012.5 - N	40	062.5 – N	60	0512.5 - N	36	
0025.0 - N	38	0275.0 – N	60	0525.0 - N	34	
0.037.5 - N	34	0.287.5 –N	50	0.537.5 - N	54	
0050.0 - N	30	0300.0 – N	48	0550.0 - N	56	
0062.5 - N	30	0312.5 – N	30	0662.5 - N	54	
0075.0 - N	32	0325.0 – N	36	0575.0 - N	54	
0087.5 - N	34	0337.5 – N	48	0587.5 - N	50	
0100.0 - N	36	0350.0 –N	36	0600.0 - N	54	
0112.5 - N	36	0362.5 – N	42	0612.5 - N	50	
0125.0 - N	34	0375.0 – N	38	0625.0 - N	54	
0137.5 - N	34	0387.5 – N	46	0637.5 - N	54	
0150.0 - N	36	0400.0 – N	46	0650.0 - N	58	
0162.5 - N	42	0412.5 – N	40	0662.5 - N	54	
0175.0 - N	42	0425.0 – N	36	0675.0 - N	54	
0187.5 - N	50	0437.5 – N	38	0687.5 - N	48	
0200.0 - N	50	0450.0 – N	40	0700.0 - N	54	
0212.5 - N	54	0462.5 – N	36	0712.5 - N	48	
0225.0 - N	52	0475.0 – N	40	0725.0 - N	56	
0237.5 - N	58	0487.5 – N	34	0737.5 - N	54	
0250.0 - N	60	0500.0 – N	32	0750.0 - N	52	
<b>Note :</b> L'enregistrement des données est fait avec un magnétomètre de marque Scintrex BGS-1SL. L'unité de mesure est le <b>cps</b> qui signifie <b>scintillement / seconde.</b>						
Liens avec fiche N° : 3 –E ( 2 / 2)						
Fiche complétée par : Valentino Nelson & William Colas						

<b>SODEMINE, S.A.</b>						<b>Ligne</b>
<b>Levés radiométriques de la région de Terre Neuve</b>						<b>N°: 3 –E</b>
						<b>( 2 / 2 )</b>
<b>Station (m)</b>	<b>Lecture (cps)</b>	<b>Station (m)</b>	<b>Lecture (cps)</b>	<b>Station (m)</b>	<b>Lecture (cps)</b>	<b>Validation des données</b>
<b>0750.0 - N</b>	<b>52</b>	<b>1000.0 – N</b>	<b>62</b>	<b>1250.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0762.5 - N	56	1012.5 – N	N/A	1262.5 - N	N/A	
<b>0775.0 - N</b>	<b>58</b>	<b>1025.0 – N</b>	<b>N/A</b>	<b>1275.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0787.5 - N	60	1037.5 – N	N/A	1.287.5 - N	N/A	
<b>0800.0 - N</b>	<b>60</b>	<b>1050.0 – N</b>	<b>N/A</b>	<b>1300.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0812.5 - N	60	1062.5 – N	N/A	1312.5 - N	N/A	
<b>0825.0 - N</b>	<b>62</b>	<b>1075.0 – N</b>	<b>N/A</b>	<b>1325.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0837.5 - N	50	1087.5 – N	N/A	1337.5 - N	N/A	
<b>0850.0 - N</b>	<b>54</b>	<b>1100.0 – N</b>	<b>N/A</b>	<b>1350.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0862.5 - N	52	1112.5 – N	N/A	1362.5 - N	N/A	
<b>0875.0 - N</b>	<b>58</b>	<b>1125.0 – N</b>	<b>N/A</b>	<b>1375.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0887.5 - N	68	1137.5 – N	N/A	1387.5 - N	N/A	
<b>0900.0 - N</b>	<b>66</b>	<b>1150.0 – N</b>	<b>N/A</b>	<b>1400.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0912.5 - N	54	1162.5 – N	N/A	1412.5 - N	N/A	
<b>0925.0 - N</b>	<b>54</b>	<b>1175.0 – N</b>	<b>N/A</b>	<b>1425.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0937.5 - N	60	1187.5 – N	N/A	1437.5 - N	N/A	
<b>0950.0 - N</b>	<b>60</b>	<b>1200.0 – N</b>	<b>N/A</b>	<b>1450.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0962.5 - N	58	1212.5 – N	N/A	1462.5 - N	N/A	
<b>0975.0 - N</b>	<b>60</b>	<b>1225.0 – N</b>	<b>N/A</b>	<b>1475.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0987.5 - N	58	1237.5 – N	N/A	1487.5 - N	N/A	
<b>1000.0 - N</b>	<b>62</b>	<b>1250.0 – N</b>	<b>N/A</b>	<b>1500.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
<b>Note :</b> L'enregistrement des données est fait avec un magnétomètre de marque Scintrex BGS-ISL. L'unité de mesure est le <b>cps</b> qui signifie <b>scintillement / seconde.</b>						Date: 2018
Liens avec fiche N° : 3 –E ( 1 / 2 )						
Fiche complétée par : Valentino Nelson & William Colas						

<b>SODEMINE, S.A.</b>						<b>Ligne</b>
<b>Levés radiométriques de la région de Terre Neuve</b>						<b>N°: 4 –E</b>
						<b>( 1 / 2 )</b>
Station (m)	Lecture (cps)	Station (m)	Lecture (cps)	Station (m)	Lecture (cps)	Validation des données
<b>0000.0 - N</b>	<b>32</b>	<b>0250.0 - N</b>	<b>52</b>	<b>0500.0 - N</b>	<b>34</b>	
0012.5 - N	30	062.5 - N	50	0512.5 - N	32	
<b>0025.0 - N</b>	<b>44</b>	<b>0275.0 - N</b>	<b>60</b>	<b>0525.0 - N</b>	<b>24</b>	
0.037.5 - N	42	0.287.5 - N	54	0.537.5 - N	34	
<b>0050.0 - N</b>	<b>46</b>	<b>0300.0 - N</b>	<b>56</b>	<b>0550.0 - N</b>	<b>26</b>	
0062.5 - N	44	0312.5 - N	54	0662.5 - N	28	
<b>0075.0 - N</b>	<b>42</b>	<b>0325.0 - N</b>	<b>64</b>	<b>0575.0 - N</b>	<b>30</b>	
0087.5 - N	40	0337.5 - N	60	0587.5 - N	30	
<b>0100.0 - N</b>	<b>50</b>	<b>0350.0 - N</b>	<b>58</b>	<b>0600.0 - N</b>	<b>24</b>	
0112.5 - N	46	0362.5 - N	56	0612.5 - N	24	
<b>0125.0 - N</b>	<b>56</b>	<b>0375.0 - N</b>	<b>56</b>	<b>0625.0 - N</b>	<b>22</b>	
0137.5 - N	54	0387.5 - N	54	0637.5 - N	20	
<b>0150.0 - N</b>	<b>54</b>	<b>0400.0 - N</b>	<b>54</b>	<b>0650.0 - N</b>	<b>22</b>	
0162.5 - N	54	0412.5 - N	54	0662.5 - N	24	
<b>0175.0 - N</b>	<b>56</b>	<b>0425.0 - N</b>	<b>54</b>	<b>0675.0 - N</b>	<b>22</b>	
0187.5 - N	60	0437.5 - N	38	0687.5 - N	32	
<b>0200.0 - N</b>	<b>56</b>	<b>0450.0 - N</b>	<b>52</b>	<b>0700.0 - N</b>	<b>30</b>	
0212.5 - N	58	0462.5 - N	52	0712.5 - N	24	
<b>0225.0 - N</b>	<b>50</b>	<b>0475.0 - N</b>	<b>48</b>	<b>0725.0 - N</b>	<b>26</b>	
0237.5 - N	54	0487.5 - N	44	0737.5 - N	36	
<b>0250.0 - N</b>	<b>52</b>	<b>0500.0 - N</b>	<b>34</b>	<b>0750.0 - N</b>	<b>48</b>	
<b>Note :</b> L'enregistrement des données est fait avec un magnétomètre de marque Scintrex BGS-1SL. L'unité de mesure est le <b>cps</b> qui signifie <b>scintillement / seconde.</b>						
Liens avec fiche N° : 4 –E ( 2 / 2 )						
Fiche complétée par : Valentino Nelson & William Colas						

<b>SODEMINE, S.A.</b>						<b>Ligne</b>
<b>Levés radiométriques de la région de Terre Neuve</b>						<b>N°: 4 –E</b> <b>( 2 / 2 )</b>
Station (m)	Lecture (cps)	Station (m)	Lecture (cps)	Station (m)	Lecture (cps)	Validation des données
<b>0750.0 - N</b>	<b>48</b>	<b>1000.0 – N</b>	<b>34</b>	<b>1250.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0762.5 - N	46	1012.5 – N	26	1262.5 - N	<b>N/A</b>	
<b>0775.0 - N</b>	<b>40</b>	<b>1025.0 – N</b>	<b>32</b>	<b>1275.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0787.5 - N	40	1037.5 – N	32	1.287.5 - N	<b>N/A</b>	
<b>0800.0 - N</b>	<b>42</b>	<b>1050.0 – N</b>	<b>30</b>	<b>1300.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0812.5 - N	42	1062.5 – N	26	1312.5 - N	<b>N/A</b>	
<b>0825.0 - N</b>	<b>46</b>	<b>1075.0 – N</b>	<b>30</b>	<b>1325.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0837.5 - N	46	1087.5 – N	22	1337.5 - N	<b>N/A</b>	
<b>0850.0 - N</b>	<b>40</b>	<b>1100.0 – N</b>	<b>28</b>	<b>1350.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0862.5 - N	38	1112.5 – N	<b>N/A</b>	1362.5 - N	<b>N/A</b>	
<b>0875.0 - N</b>	<b>40</b>	<b>1125.0 – N</b>	<b>N/A</b>	<b>1375.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0887.5 - N	46	1137.5 – N	<b>N/A</b>	1387.5 - N	<b>N/A</b>	
<b>0900.0 - N</b>	<b>50</b>	<b>1150.0 – N</b>	<b>N/A</b>	<b>1400.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0912.5 - N	50	1162.5 – N	<b>N/A</b>	1412.5 - N	<b>N/A</b>	
<b>0925.0 - N</b>	<b>50</b>	<b>1175.0 – N</b>	<b>N/A</b>	<b>1425.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0937.5 - N	42	1187.5 – N	<b>N/A</b>	1437.5 - N	<b>N/A</b>	
<b>0950.0 - N</b>	<b>40</b>	<b>1200.0 – N</b>	<b>N/A</b>	<b>1450.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0962.5 - N	36	1212.5 – N	<b>N/A</b>	1462.5 - N	<b>N/A</b>	
<b>0975.0 - N</b>	<b>28</b>	<b>1225.0 – N</b>	<b>N/A</b>	<b>1475.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0987.5 - N	28	1237.5 – N	<b>N/A</b>	1487.5 - N	<b>N/A</b>	
<b>1000.0 - N</b>	<b>34</b>	<b>1250.0 – N</b>	<b>N/A</b>	<b>1500.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
<b>Note :</b> L'enregistrement des données est fait avec un magnétomètre de marque Scintrex BGS-1SL. L'unité de mesure est le <b>cps</b> qui signifie <b>scintillement / seconde.</b>						Date: 2018
Liens avec fiche N° : 4 –E ( 1 / 2 )						
Fiche complétée par : Valentino Nelson & William Colas						

<b>SODEMINE, S.A.</b>						<b>Ligne</b>
<b>Levés radiométriques de la région de Terre Neuve</b>						<b>N°: 5 –E ( 1 / 2)</b>
Station (m)	Lecture (cps)	Station (m)	Lecture (cps)	Station (m)	Lecture (cps)	Validation des données
<b>0000.0 - N</b>	<b>46</b>	<b>0250.0 – N</b>	<b>52</b>	<b>0500.0 - N</b>	<b>18</b>	
0012.5 - N	40	062.5 – N	60	0512.5 - N	20	
<b>0025.0 - N</b>	<b>42</b>	<b>0275.0 – N</b>	<b>60</b>	<b>0525.0 - N</b>	<b>18</b>	
0.037.5 -N	42	0.287.5 – N	56	0.537.5 - N	22	
<b>0050.0 - N</b>	<b>40</b>	<b>0300.0 – N</b>	<b>60</b>	<b>0550.0 - N</b>	<b>20</b>	
0062.5 - N	42	0312.5 – N	54	0662.5 - N	22	
<b>0075.0 - N</b>	<b>40</b>	<b>0325.0 – N</b>	<b>28</b>	<b>0575.0 - N</b>	<b>20</b>	
0087.5 - N	40	0337.5 – N	26	0587.5 - N	26	
<b>0100.0 - N</b>	<b>42</b>	<b>0350.0 – N</b>	<b>30</b>	<b>0600.0 - N</b>	<b>20</b>	
0112.5 - N	42	0362.5 – N	22	0612.5 - N	22	
<b>0125.0 - N</b>	<b>40</b>	<b>0375.0 – N</b>	<b>22</b>	<b>0625.0 - N</b>	<b>18</b>	
0137.5 - N	42	0387.5 – N	24	0637.5 - N	16	
<b>0150.0 - N</b>	<b>52</b>	<b>0400.0 – N</b>	<b>24</b>	<b>0650.0 - N</b>	<b>18</b>	
0162.5 - N	54	0412.5 – N	22	0662.5 - N	16	
<b>0175.0 - N</b>	<b>56</b>	<b>0425.0 – N</b>	<b>24</b>	<b>0675.0 - N</b>	<b>18</b>	
0187.5 - N	56	0437.5 – N	26	0687.5 - N	18	
<b>0200.0 - N</b>	<b>54</b>	<b>0450.0 – N</b>	<b>24</b>	<b>0700.0 - N</b>	<b>18</b>	
0212.5 - N	54	0462.5 – N	26	0712.5 - N	18	
<b>0225.0 - N</b>	<b>52</b>	<b>0475.0 – N</b>	<b>18</b>	<b>0725.0 - N</b>	<b>18</b>	
0237.5 - N	54	0487.5 – N	18	0737.5 - N	20	
<b>0250.0 - N</b>	<b>52</b>	<b>0500.0 – N</b>	<b>18</b>	<b>0750.0 - N</b>	<b>20</b>	
<b>Note :</b> L'enregistrement des données est fait avec un magnétomètre de marque Scintrex BGS-ISL. L'unité de mesure est le <b>cps</b> qui signifie <b>scintillement / seconde.</b>						Date: 2018
Liens avec fiche N° : 5 –E ( 1 / 2)						
Fiche complétée par : Valentino Nelson & William Colas						

<b>SODEMINE, S.A.</b>						<b>Ligne</b>
<b>Levés radiométriques de la région de Terre Neuve</b>						<b>N°: 5 –E</b>
						<b>( 2 / 2 )</b>
Station (m)	Lecture (cps)	Station (m)	Lecture (cps)	Station (m)	Lecture (cps)	Validation des données
<b>0750.0 - N</b>	<b>20</b>	<b>1000.0 – N</b>	<b>20</b>	<b>1250.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0762.5 - N	22	1012.5 – N	20	1262.5 - N	<b>N/A</b>	
<b>0775.0 - N</b>	<b>18</b>	<b>1025.0 – N</b>	<b>20</b>	<b>1275.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0787.5 - N	22	1037.5 – N	22	1.287.5 - N	<b>N/A</b>	
<b>0800.0 - N</b>	<b>20</b>	<b>1050.0 – N</b>	<b>24</b>	<b>1300.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0812.5 - N	22	1062.5 – N	20	1312.5 - N	<b>N/A</b>	
<b>0825.0 - N</b>	<b>26</b>	<b>1075.0 – N</b>	<b>22</b>	<b>1325.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0837.5 - N	22	1087.5 – N	22	1337.5 - N	<b>N/A</b>	
<b>0850.0 - N</b>	<b>22</b>	<b>1100.0 – N</b>	<b>24</b>	<b>1350.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0862.5 - N	30	1112.5 – N	<b>N/A</b>	1362.5 - N	<b>N/A</b>	
<b>0875.0 - N</b>	<b>30</b>	<b>1125.0 – N</b>	<b>N/A</b>	<b>1375.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0887.5 - N	38	1137.5 – N	<b>N/A</b>	1387.5 - N	<b>N/A</b>	
<b>0900.0 - N</b>	<b>44</b>	<b>1150.0 – N</b>	<b>N/A</b>	<b>1400.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0912.5 - N	34	1162.5 – N	<b>N/A</b>	1412.5 - N	<b>N/A</b>	
<b>0925.0 - N</b>	<b>34</b>	<b>1175.0 – N</b>	<b>N/A</b>	<b>1425.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0937.5 - N	30	1187.5 – N	<b>N/A</b>	1437.5 - N	<b>N/A</b>	
<b>0950.0 - N</b>	<b>30</b>	<b>1200.0 – N</b>	<b>N/A</b>	<b>1450.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0962.5 - N	26	1212.5 – N	<b>N/A</b>	1462.5 - N	<b>N/A</b>	
<b>0975.0 - N</b>	<b>26</b>	<b>1225.0 – N</b>	<b>N/A</b>	<b>1475.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0987.5 - N	22	1237.5 – N	<b>N/A</b>	1487.5 - N	<b>N/A</b>	
<b>1000.0 - N</b>	<b>22</b>	<b>1250.0 – N</b>	<b>N/A</b>	<b>1500.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
<b>Note :</b> L'enregistrement des données est fait avec un magnétomètre de marque Scintrex BGS-1SL. L'unité de mesure est le <b>cps</b> qui signifie <b>scintillement / seconde.</b>						Date: 2018
Liens avec fiche N° : 5 –E ( 1 / 2 )						
Fiche complétée par : Valentino Nelson & William Colas						

<b>SODEMINE, S.A.</b>						<b>Ligne</b>
<b>Levés radiométriques de la région de Terre Neuve</b>						<b>N°: 6 –E</b> <b>( 1 / 2 )</b>
Station (m)	Lecture (cps)	Station (m)	Lecture (cps)	Station (m)	Lecture (cps)	Validation des données
<b>0000.0 - N</b>	<b>28</b>	<b>0250.0 – N</b>	<b>32</b>	<b>0500.0 - N</b>	<b>24</b>	
0012.5 - N	30	062.5 – N	32	0512.5 - N	20	
<b>0025.0 - N</b>	<b>28</b>	<b>0275.0 – N</b>	<b>32</b>	<b>0525.0 - N</b>	<b>20</b>	
0.037.5 -N	30	0.287.5 –N	28	0.537.5 - N	20	
<b>0050.0 - N</b>	<b>30</b>	<b>0300.0 – N</b>	<b>34</b>	<b>0550.0 - N</b>	<b>20</b>	
0062.5 - N	28	0312.5 – N	28	0662.5 - N	18	
<b>0075.0 - N</b>	<b>30</b>	<b>0325.0 – N</b>	<b>30</b>	<b>0575.0 - N</b>	<b>16</b>	
0087.5 - N	34	0337.5 – N	40	0587.5 - N	16	
<b>0100.0 - N</b>	<b>36</b>	<b>0350.0 – N</b>	<b>40</b>	<b>0600.0 - N</b>	<b>16</b>	
0112.5 - N	42	0362.5 – N	34	0612.5 - N	16	
<b>0125.0 - N</b>	<b>40</b>	<b>0375.0 – N</b>	<b>38</b>	<b>0625.0 - N</b>	<b>14</b>	
0137.5 - N	42	0387.5 – N	38	0637.5 - N	14	
<b>0150.0 - N</b>	<b>44</b>	<b>0400.0 – N</b>	<b>46</b>	<b>0650.0 - N</b>	<b>14</b>	
0162.5 - N	42	0412.5 – N	60	0662.5 - N	16	
<b>0175.0 - N</b>	<b>42</b>	<b>0425.0 – N</b>	<b>62</b>	<b>0675.0 - N</b>	<b>14</b>	
0187.5 - N	44	0437.5 – N	50	0687.5 - N	16	
<b>0200.0 - N</b>	<b>42</b>	<b>0450.0 – N</b>	<b>38</b>	<b>0700.0 - N</b>	<b>16</b>	
0212.5 - N	38	0462.5 – N	26	0712.5 - N	14	
<b>0225.0 - N</b>	<b>34</b>	<b>0475.0 – N</b>	<b>26</b>	<b>0725.0 - N</b>	<b>14</b>	
0237.5 - N	28	0487.5 – N	22	0737.5 - N	16	
<b>0250.0 - N</b>	<b>32</b>	<b>0500.0 – N</b>	<b>24</b>	<b>0750.0 - N</b>	<b>16</b>	
<b>Note :</b> L'enregistrement des données est fait avec un magnétomètre de marque Scintrex BGS-ISL. L'unité de mesure est le <b>cps</b> qui signifie <b>scintillement / seconde.</b>						Date: 2018
Liens avec fiche N° : 6 –E ( 2 / 2 )						
Fiche complétée par : Valentino Nelson & William Colas						

<b>SODEMINE, S.A.</b>						<b>Ligne</b>
<b>Levés radiométriques de la région de Terre Neuve</b>						<b>N°: 6 –E</b> <b>( 2 / 2 )</b>
<b>Station (m)</b>	<b>Lecture (cps)</b>	<b>Station (m)</b>	<b>Lecture (cps)</b>	<b>Station (m)</b>	<b>Lecture (cps)</b>	<b>Validation des données</b>
<b>0750.0 - N</b>	<b>16</b>	<b>1000.0 – N</b>	<b>N/A</b>	<b>1250.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0762.5 - N	16	1012.5 – N	N/A	1262.5 - N	N/A	
<b>0775.0 - N</b>	<b>16</b>	<b>1025.0 – N</b>	<b>N/A</b>	<b>1275.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0787.5 - N	22	1037.5 – N	N/A	1.287.5 - N	N/A	
<b>0800.0 - N</b>	<b>22</b>	<b>1050.0 – N</b>	<b>N/A</b>	<b>1300.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0812.5 - N	34	1062.5 – N	N/A	1312.5 - N	N/A	
<b>0825.0 - N</b>	<b>42</b>	<b>1075.0 – N</b>	<b>N/A</b>	<b>1325.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0837.5 - N	30	1087.5 – N	N/A	1337.5 - N	N/A	
<b>0850.0 - N</b>	<b>28</b>	<b>1100.0 – N</b>	<b>N/A</b>	<b>1350.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0862.5 - N	36	1112.5 – N	N/A	1362.5 - N	N/A	
<b>0875.0 - N</b>	<b>36</b>	<b>1125.0 – N</b>	<b>N/A</b>	<b>1375.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0887.5 - N	32	1137.5 – N	N/A	1387.5 - N	N/A	
<b>0900.0 - N</b>	<b>28</b>	<b>1150.0 – N</b>	<b>N/A</b>	<b>1400.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0912.5 - N	N/A	1162.5 – N	N/A	1412.5 - N	N/A	
<b>0925.0 - N</b>	<b>N/A</b>	<b>1175.0 – N</b>	<b>N/A</b>	<b>1425.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0937.5 - N	N/A	1187.5 – N	N/A	1437.5 - N	N/A	
<b>0950.0 - N</b>	<b>N/A</b>	<b>1200.0 – N</b>	<b>N/A</b>	<b>1450.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0962.5 - N	N/A	1212.5 – N	N/A	1462.5 - N	N/A	
<b>0975.0 - N</b>	<b>N/A</b>	<b>1225.0 – N</b>	<b>N/A</b>	<b>1475.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0987.5 - N	N/A	1237.5 – N	N/A	1487.5 - N	N/A	
<b>1000.0 - N</b>	<b>N/A</b>	<b>1250.0 – N</b>	<b>N/A</b>	<b>1500.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
<b>Note :</b> L'enregistrement des données est fait avec un magnétomètre de marque Scintrex BGS-1SL. L'unité de mesure est le <b>cps</b> qui signifie <b>scintillement / seconde.</b>						Date: 2018
Liens avec fiche N° : 6 –E ( 1 / 2 )						
Fiche complétée par : Valentino Nelson & William Colas						

<b>SODEMINE, S.A.</b>						<b>Ligne</b>
<b>Levés radiométriques de la région de Terre Neuve</b>						<b>N°: 7 –E</b>
						<b>( 1 / 2 )</b>
Station (m)	Lecture (cps)	Station (m)	Lecture (cps)	Station (m)	Lecture (cps)	Validation des données
<b>0000.0 - N</b>	<b>40</b>	<b>0250.0 – N</b>	<b>38</b>	<b>0500.0 - N</b>	<b>38</b>	
0012.5 - N	40	062.5 – N	36	0512.5 - N	38	
<b>0025.0 - N</b>	<b>38</b>	<b>0275.0 – N</b>	<b>28</b>	<b>0525.0 - N</b>	<b>38</b>	
0.037.5 -N	36	0.287.5 –N	26	0.537.5 - N	38	
<b>0050.0 - N</b>	<b>36</b>	<b>0300.0 – N</b>	<b>26</b>	<b>0550.0 - N</b>	<b>40</b>	
0062.5 - N	36	0312.5 – N	24	0662.5 - N	40	
<b>0075.0 - N</b>	<b>38</b>	<b>0325.0 – N</b>	<b>26</b>	<b>0575.0 - N</b>	<b>38</b>	
0087.5 - N	38	0337.5 – N	24	0587.5 - N	16	
<b>0100.0 - N</b>	<b>36</b>	<b>0350.0 – N</b>	<b>22</b>	<b>0600.0 - N</b>	<b>16</b>	
0112.5 - N	36	0362.5 – N	24	0612.5 - N	16	
<b>0125.0 - N</b>	<b>44</b>	<b>0375.0 – N</b>	<b>28</b>	<b>0625.0 - N</b>	<b>16</b>	
0137.5 - N	42	0387.5 – N	28	0637.5 - N	16	
<b>0150.0 - N</b>	<b>42</b>	<b>0400.0 – N</b>	<b>34</b>	<b>0650.0 - N</b>	<b>16</b>	
0162.5 - N	42	0412.5 – N	36	0662.5 - N	16	
<b>0175.0 - N</b>	<b>48</b>	<b>0425.0 – N</b>	<b>60</b>	<b>0675.0 - N</b>	<b>16</b>	
0187.5 - N	46	0437.5 – N	50	0687.5 - N	16	
<b>0200.0 - N</b>	<b>48</b>	<b>0450.0 – N</b>	<b>42</b>	<b>0700.0 - N</b>	<b>12</b>	
0212.5 - N	48	0462.5 – N	32	0712.5 - N	14	
<b>0225.0 - N</b>	<b>46</b>	<b>0475.0 – N</b>	<b>36</b>	<b>0725.0 - N</b>	<b>20</b>	
0237.5 - N	44	0487.5 – N	34	0737.5 - N	20	
<b>0250.0 - N</b>	<b>38</b>	<b>0500.0 – N</b>	<b>38</b>	<b>0750.0 - N</b>	<b>18</b>	
<b>Note :</b> L'enregistrement des données est fait avec un magnétomètre de marque Scintrex BGS-1SL. L'unité de mesure est le <b>cps</b> qui signifie <b>scintillement / seconde.</b>						Date: 2018
Liens avec fiche N° : 7 –E ( 2 / 2 )						
Fiche complétée par : Valentino Nelson & William Colas						

SODEMINE, S.A.						Ligne
Levés radiométriques de la région de Terre Neuve						N°: 7 -E ( 2 / 2)
Station (m)	Lecture (cps)	Station (m)	Lecture (cps)	Station (m)	Lecture (cps)	Validation des données
0750.0 - N	18	1000.0 - N	N/A	1250.0 - N	N/A	
0762.5 - N	20	1012.5 - N	N/A	1262.5 - N	N/A	
0775.0 - N	22	1025.0 - N	N/A	1275.0 - N	N/A	
0787.5 - N	28	1037.5 - N	N/A	1.287.5 - N	N/A	
0800.0 - N	24	1050.0 - N	N/A	1300.0 - N	N/A	
0812.5 - N	N/A	1062.5 - N	N/A	1312.5 - N	N/A	
0825.0 - N	N/A	1075.0 - N	N/A	1325.0 - N	N/A	
0837.5 - N	N/A	1087.5 - N	N/A	1337.5 - N	N/A	
0850.0 - N	N/A	1100.0 - N	N/A	1350.0 - N	N/A	
0862.5 - N	N/A	1112.5 - N	N/A	1362.5 - N	N/A	
0875.0 - N	N/A	1125.0 - N	N/A	1375.0 - N	N/A	
0887.5 - N	N/A	1137.5 - N	N/A	1387.5 - N	N/A	
0900.0 - N	N/A	1150.0 - N	N/A	1400.0 - N	N/A	
0912.5 - N	N/A	1162.5 - N	N/A	1412.5 - N	N/A	
0925.0 - N	N/A	1175.0 - N	N/A	1425.0 - N	N/A	
0937.5 - N	N/A	1187.5 - N	N/A	1437.5 - N	N/A	
0950.0 - N	N/A	1200.0 - N	N/A	1450.0 - N	N/A	
0962.5 - N	N/A	1212.5 - N	N/A	1462.5 - N	N/A	
0975.0 - N	N/A	1225.0 - N	N/A	1475.0 - N	N/A	
0987.5 - N	N/A	1237.5 - N	N/A	1487.5 - N	N/A	
1000.0 - N	N/A	1250.0 - N	N/A	1500.0 - N	N/A	
<b>Note :</b> L'enregistrement des données est fait avec un magnétomètre de marque Scintrex BGS-ISL. L'unité de mesure est le <b>cps</b> qui signifie <b>scintillement / seconde</b> .						Date: 2018
Liens avec fiche N° : 7 -E ( 1 / 2)						
Fiche complétée par : Valentino Nelson & William Colas						

<b>SODEMINE, S.A.</b>						<b>Ligne</b>
<b>Levés radiométriques de la région de Terre Neuve</b>						<b>N°: 8 –E</b>
						<b>( 1 / 2 )</b>
Station (m)	Lecture (cps)	Station (m)	Lecture (cps)	Station (m)	Lecture (cps)	Validation des données
<b>0000.0 - N</b>	<b>32</b>	<b>0250.0 - N</b>	<b>52</b>	<b>0500.0 - N</b>	<b>60</b>	
0012.5 - N	34	062.5 - N	56	0512.5 - N	32	
<b>0025.0 - N</b>	<b>36</b>	<b>0275.0 - N</b>	<b>60</b>	<b>0525.0 - N</b>	<b>30</b>	
0.037.5 - N	40	0.287.5 - N	60	0.537.5 - N	32	
<b>0050.0 - N</b>	<b>36</b>	<b>0300.0 - N</b>	<b>60</b>	<b>0550.0 - N</b>	<b>28</b>	
0062.5 - N	38	0312.5 - N	56	0662.5 - N	28	
<b>0075.0 - N</b>	<b>38</b>	<b>0325.0 - N</b>	<b>56</b>	<b>0575.0 - N</b>	<b>36</b>	
0087.5 - N	38	0337.5 - N	62	0587.5 - N	28	
<b>0100.0 - N</b>	<b>38</b>	<b>0350.0 - N</b>	<b>62</b>	<b>0600.0 - N</b>	<b>24</b>	
0112.5 - N	44	0362.5 - N	62	0612.5 - N	18	
<b>0125.0 - N</b>	<b>50</b>	<b>0375.0 - N</b>	<b>62</b>	<b>0625.0 - N</b>	<b>16</b>	
0137.5 - N	44	0387.5 - N	42	0637.5 - N	18	
<b>0150.0 - N</b>	<b>46</b>	<b>0400.0 - N</b>	<b>42</b>	<b>0650.0 - N</b>	<b>16</b>	
0162.5 - N	46	0412.5 - N	52	0662.5 - N	16	
<b>0175.0 - N</b>	<b>44</b>	<b>0425.0 - N</b>	<b>48</b>	<b>0675.0 - N</b>	<b>16</b>	
0187.5 - N	44	0437.5 - N	56	0687.5 - N	22	
<b>0200.0 - N</b>	<b>44</b>	<b>0450.0 - N</b>	<b>60</b>	<b>0700.0 - N</b>	<b>20</b>	
0212.5 - N	42	0462.5 - N	56	0712.5 - N	16	
<b>0225.0 - N</b>	<b>48</b>	<b>0475.0 - N</b>	<b>46</b>	<b>0725.0 - N</b>	<b>16</b>	
0237.5 - N	46	0487.5 - N	54	0737.5 - N	24	
<b>0250.0 - N</b>	<b>52</b>	<b>0500.0 - N</b>	<b>60</b>	<b>0750.0 - N</b>	<b>24</b>	
<b>Note :</b> L'enregistrement des données est fait avec un magnétomètre de marque Scintrex BGS-1SL. L'unité de mesure est le <b>cps</b> qui signifie <b>scintillement / seconde</b> .						Date: 2018
Liens avec fiche N° : 8 –E ( 2 / 2 )						
Fiche complétée par : Valentino Nelson & William Colas						

SODEMINE, S.A.						Ligne
Levés radiométriques de la région de Terre Neuve						N°: 8 –E ( 2 / 2 )
Station (m)	Lecture (cps)	Station (m)	Lecture (cps)	Station (m)	Lecture (cps)	Validation des données
0750.0 - N	24	1000.0 - N	N/A	1250.0 - N	N/A	
0762.5 - N	22	1012.5 - N	N/A	1262.5 - N	N/A	
0775.0 - N	28	1025.0 - N	N/A	1275.0 - N	N/A	
0787.5 - N	30	1037.5 - N	N/A	1.287.5 - N	N/A	
0800.0 - N	42	1050.0 - N	N/A	1300.0 - N	N/A	
0812.5 - N	N/A	1062.5 - N	N/A	1312.5 - N	N/A	
0825.0 - N	N/A	1075.0 - N	N/A	1325.0 - N	N/A	
0837.5 - N	N/A	1087.5 - N	N/A	1337.5 - N	N/A	
0850.0 - N	N/A	1100.0 - N	N/A	1350.0 - N	N/A	
0862.5 - N	N/A	1112.5 - N	N/A	1362.5 - N	N/A	
0875.0 - N	N/A	1125.0 - N	N/A	1375.0 - N	N/A	
0887.5 - N	N/A	1137.5 - N	N/A	1387.5 - N	N/A	
0900.0 - N	N/A	1150.0 - N	N/A	1400.0 - N	N/A	
0912.5 - N	N/A	1162.5 - N	N/A	1412.5 - N	N/A	
0925.0 - N	N/A	1175.0 - N	N/A	1425.0 - N	N/A	
0937.5 - N	N/A	1187.5 - N	N/A	1437.5 - N	N/A	
0950.0 - N	N/A	1200.0 - N	N/A	1450.0 - N	N/A	
0962.5 - N	N/A	1212.5 - N	N/A	1462.5 - N	N/A	
0975.0 - N	N/A	1225.0 - N	N/A	1475.0 - N	N/A	
0987.5 - N	N/A	1237.5 - N	N/A	1487.5 - N	N/A	
1000.0 - N	N/A	1250.0 - N	N/A	1500.0 - N	N/A	
<b>Note :</b> L'enregistrement des données est fait avec un magnétomètre de marque Scintrex BGS-ISL. L'unité de mesure est le <b>cps</b> qui signifie <b>scintillement / seconde</b> .						Date: 2018
Liens avec fiche N° : 8 –E ( 1 / 2 )						
Fiche complétée par : Valentino Nelson & William Colas						

<b>SODEMINE, S.A.</b>						<b>Ligne</b>
<b>Levés radiométriques de la région de Terre Neuve</b>						<b>N°: 9 –E</b>
						<b>( 1 / 2 )</b>
Station (m)	Lecture (cps)	Station (m)	Lecture (cps)	Station (m)	Lecture (cps)	Validation des données
<b>0000.0 – N</b>	<b>22</b>	<b>0250.0 – N</b>	<b>54</b>	<b>0500.0 - N</b>	<b>38</b>	
0012.5 – N	32	062.5 – N	54	0512.5 - N	38	
<b>0025.0 – N</b>	<b>26</b>	<b>0275.0 – N</b>	<b>38</b>	<b>0525.0 - N</b>	<b>38</b>	
0.037.5 –N	30	0.287.5 –N	38	0.537.5 - N	36	
<b>0050.0 – N</b>	<b>36</b>	<b>0300.0 – N</b>	<b>64</b>	<b>0550.0 - N</b>	<b>36</b>	
0062.5 – N	32	0312.5 – N	38	0662.5 - N	36	
<b>0075.0 – N</b>	<b>34</b>	<b>0325.0 – N</b>	<b>62</b>	<b>0575.0 - N</b>	<b>24</b>	
0087.5 – N	34	0337.5 – N	62	0587.5 - N	24	
<b>0100. 0 –N</b>	<b>32</b>	<b>0350. 0 –N</b>	<b>64</b>	<b>0600. 0 - N</b>	<b>22</b>	
0112.5 – N	34	0362.5 – N	64	0612.5 - N	22	
<b>0125.0 – N</b>	<b>34</b>	<b>0375.0 – N</b>	<b>62</b>	<b>0625.0 - N</b>	<b>26</b>	
0137.5 – N	34	0387.5 – N	64	0637.5 - N	30	
<b>0150.0 – N</b>	<b>38</b>	<b>0400.0 – N</b>	<b>60</b>	<b>0650.0 - N</b>	<b>28</b>	
0162.5 – N	38	0412.5 – N	56	0662.5 - N	34	
<b>0175.0 – N</b>	<b>48</b>	<b>0425.0 – N</b>	<b>60</b>	<b>0675.0 - N</b>	<b>42</b>	
0187.5 – N	44	0437.5 – N	56	0687.5 - N	42	
<b>0200.0 – N</b>	<b>40</b>	<b>0450.0 – N</b>	<b>52</b>	<b>0700.0 - N</b>	<b>40</b>	
0212.5 – N	38	0462.5 – N	52	0712.5 - N	38	
<b>0225.0 – N</b>	<b>46</b>	<b>0475.0 – N</b>	<b>42</b>	<b>0725.0 - N</b>	<b>44</b>	
0237.5 – N	56	0487.5 – N	48	0737.5 - N	36	
<b>0250.0 – N</b>	<b>54</b>	<b>0500.0 – N</b>	<b>38</b>	<b>0750.0 - N</b>	<b>42</b>	
<b>Note :</b> L'enregistrement des données est fait avec un magnétomètre de marque Scintrex BGS-ISL. L'unité de mesure est le <b>cps</b> qui signifie <b>scintillement / seconde.</b>						Date: 2018
Liens avec fiche N° : 9 –E ( 2 / 2 )						
Fiche complétée par : Valentino Nelson & William Colas						

<b>SODEMINE, S.A.</b>						<b>Ligne</b>
<b>Levés radiométriques de la région de Terre Neuve</b>						<b>N°: 9 –E</b> <b>( 2 / 2 )</b>
<b>Station (m)</b>	<b>Lecture (cps)</b>	<b>Station (m)</b>	<b>Lecture (cps)</b>	<b>Station (m)</b>	<b>Lecture (cps)</b>	<b>Validation des données</b>
<b>0750.0 – N</b>	<b>42</b>	<b>1000.0 – N</b>	<b>N/A</b>	<b>1250.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0762.5 – N	38	1012.5 – N	N/A	1262.5 - N	N/A	
<b>0775.0 – N</b>	<b>36</b>	<b>1025.0 – N</b>	<b>N/A</b>	<b>1275.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0787.5 – N	42	1037.5 – N	N/A	1.287.5 - N	N/A	
<b>0800.0 – N</b>	<b>58</b>	<b>1050.0 – N</b>	<b>N/A</b>	<b>1300.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0812.5 – N	<b>40</b>	1062.5 – N	N/A	1312.5 - N	N/A	
<b>0825.0 – N</b>	<b>34</b>	<b>1075.0 – N</b>	<b>N/A</b>	<b>1325.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0837.5 – N	N/A	1087.5 – N	N/A	1337.5 - N	N/A	
<b>0850.0 – N</b>	<b>N/A</b>	<b>1100.0 – N</b>	<b>N/A</b>	<b>1350.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0862.5 – N	N/A	1112.5 – N	N/A	1362.5 - N	N/A	
<b>0875.0 – N</b>	<b>N/A</b>	<b>1125.0 – N</b>	<b>N/A</b>	<b>1375.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0887.5 – N	N/A	1137.5 – N	N/A	1387.5 - N	N/A	
<b>0900.0 – N</b>	<b>N/A</b>	<b>1150.0 – N</b>	<b>N/A</b>	<b>1400.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0912.5 – N	N/A	1162.5 – N	N/A	1412.5 - N	N/A	
<b>0925.0 – N</b>	<b>N/A</b>	<b>1175.0 – N</b>	<b>N/A</b>	<b>1425.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0937.5 – N	N/A	1187.5 – N	N/A	1437.5 - N	N/A	
<b>0950.0 – N</b>	<b>N/A</b>	<b>1200.0 – N</b>	<b>N/A</b>	<b>1450.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0962.5 – N	N/A	1212.5 – N	N/A	1462.5 - N	N/A	
<b>0975.0 – N</b>	<b>N/A</b>	<b>1225.0 – N</b>	<b>N/A</b>	<b>1475.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0987.5 – N	N/A	1237.5 – N	N/A	1487.5 - N	N/A	
<b>1000.0 – N</b>	<b>N/A</b>	<b>1250.0 – N</b>	<b>N/A</b>	<b>1500.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
<b>Note :</b> L'enregistrement des données est fait avec un magnétomètre de marque Scintrex BGS-ISL. L'unité de mesure est le <b>cps</b> qui signifie <b>scintillement / seconde.</b>						
Liens avec fiche <b>N° : 9 –E ( 1 / 2 )</b>						
Fiche complétée par : Valentino Nelson & William Colas						

<b>SODEMINE, S.A.</b>						<b>Ligne</b>	
<b>Levés radiométriques de la région de Terre Neuve</b>						<b>N°:10-E</b>	
						<b>( 1 / 2 )</b>	
Station (m)	Lecture (cps)	Station (m)	Lecture (cps)	Station (m)	Lecture (cps)	Validation des données	
<b>0000.0 – N</b>	<b>46</b>	<b>0250.0 – N</b>	<b>34</b>	<b>0500.0 - N</b>	<b>30</b>		
0012.5 – N	60	062.5 – N	36	0512.5 - N	38		
<b>0025.0 – N</b>	<b>64</b>	<b>0275.0 – N</b>	<b>36</b>	<b>0525.0 - N</b>	<b>38</b>		
0.037.5 –N	66	0.287.5 –N	40	0.537.5 - N	40		
<b>0050.0 – N</b>	<b>66</b>	<b>0300.0 – N</b>	<b>44</b>	<b>0550.0 - N</b>	<b>34</b>		
0062.5 – N	62	0312.5 – N	40	0662.5 - N	34		
<b>0075.0 – N</b>	<b>58</b>	<b>0325.0 – N</b>	<b>42</b>	<b>0575.0 - N</b>	<b>34</b>		
0087.5 – N	40	0337.5 – N	38	0587.5 - N	42		
<b>0100.0 – N</b>	<b>40</b>	<b>0350.0 – N</b>	<b>40</b>	<b>0600.0 - N</b>	<b>24</b>		
0112.5 – N	46	0362.5 – N	40	0612.5 - N	22		
<b>0125.0 – N</b>	<b>48</b>	<b>0375.0 – N</b>	<b>40</b>	<b>0625.0 - N</b>	<b>24</b>		
0137.5 – N	34	0387.5 – N	38	0637.5 - N	32		
<b>0150.0 – N</b>	<b>34</b>	<b>0400.0 – N</b>	<b>36</b>	<b>0650.0 - N</b>	<b>38</b>		
0162.5 – N	34	0412.5 – N	36	0662.5 - N	40		
<b>0175.0 – N</b>	<b>34</b>	<b>0425.0 – N</b>	<b>36</b>	<b>0675.0 - N</b>	<b>26</b>		
0187.5 – N	34	0437.5 – N	36	0687.5 - N	36		
<b>0200.0 – N</b>	<b>38</b>	<b>0450.0 – N</b>	<b>36</b>	<b>0700.0 - N</b>	<b>36</b>		
0212.5 – N	34	0462.5 – N	30	0712.5 - N	N/A		
<b>0225.0 – N</b>	<b>32</b>	<b>0475.0 – N</b>	<b>30</b>	<b>0725.0 - N</b>	N/A		
0237.5 – N	34	0487.5 – N	34	0737.5 - N	N/A		
<b>0250.0 – N</b>	<b>34</b>	<b>0500.0 – N</b>	<b>30</b>	<b>0750.0 - N</b>	N/A		
<b>Note :</b> L'enregistrement des données est fait avec un magnétomètre de marque Scintrex BGS-ISL. L'unité de mesure est le <b>cps</b> qui signifie <b>scintillement / seconde.</b>							Date: 2018
Liens avec fiche N° : <b>Aucun</b>							
Fiche complétée par : Valentino Nelson & William Colas							

<b>SODEMINE, S.A.</b>						<b>Ligne</b>
<b>Levés radiométriques de la région de Terre Neuve</b>						<b>N°:11-E</b>
						<b>( 1 / 1 )</b>
Station (m)	Lecture (cps)	Station (m)	Lecture (cps)	Station (m)	Lecture (cps)	Validation des données
<b>0000.0 – N</b>	<b>42</b>	<b>0250.0 – N</b>	<b>28</b>	<b>0500.0 - N</b>	<b>20</b>	
0012.5 – N	48	062.5 – N	32	0512.5 - N	20	
<b>0025.0 – N</b>	<b>38</b>	<b>0275.0 – N</b>	<b>38</b>	<b>0525.0 - N</b>	<b>20</b>	
0.037.5 –N	32	0.287.5 –N	34	0.537.5 - N	22	
<b>0050.0 – N</b>	<b>28</b>	<b>0300.0 – N</b>	<b>34</b>	<b>0550.0 - N</b>	<b>20</b>	
0062.5 – N	30	0312.5 – N	32	0662.5 - N	22	
<b>0075.0 – N</b>	<b>30</b>	<b>0325.0 – N</b>	<b>34</b>	<b>0575.0 - N</b>	<b>24</b>	
0087.5 – N	30	0337.5 – N	34	0587.5 - N	22	
<b>0100.0 – N</b>	<b>38</b>	<b>0350.0 – N</b>	<b>38</b>	<b>0600.0 - N</b>	<b>32</b>	
0112.5 – N	38	0362.5 – N	36	0612.5 - N	36	
<b>0125.0 – N</b>	<b>38</b>	<b>0375.0 – N</b>	<b>36</b>	<b>0625.0 - N</b>	<b>32</b>	
0137.5 – N	40	0387.5 – N	36	0637.5 - N	26	
<b>0150.0 – N</b>	<b>46</b>	<b>0400.0 – N</b>	<b>38</b>	<b>0650.0 - N</b>	<b>46</b>	
0162.5 – N	60	0412.5 – N	38	0662.5 - N	42	
<b>0175.0 – N</b>	<b>28</b>	<b>0425.0 – N</b>	<b>36</b>	<b>0675.0 - N</b>	<b>38</b>	
0187.5 – N	22	0437.5 – N	36	0687.5 - N	36	
<b>0200.0 – N</b>	<b>28</b>	<b>0450.0 – N</b>	<b>38</b>	<b>0700.0 - N</b>	<b>26</b>	
0212.5 – N	26	0462.5 – N	36	0712.5 - N	N/A	
<b>0225.0 – N</b>	<b>26</b>	<b>0475.0 – N</b>	<b>26</b>	<b>0725.0 - N</b>	N/A	
0237.5 – N	24	0487.5 – N	22	0737.5 - N	N/A	
<b>0250.0 – N</b>	<b>28</b>	<b>0500.0 – N</b>	<b>20</b>	<b>0750.0 - N</b>	N/A	
<b>Note :</b> L'enregistrement des données est fait avec un magnétomètre de marque Scintrex BGS-ISL. L'unité de mesure est le <b>cps</b> qui signifie <b>scintillement / seconde.</b>						Date: 2018
Liens avec fiche N° : <b>Aucun</b>						
Fiche complétée par : Valentino Nelson & William Colas						

SODEMINE, S.A.						Ligne
Levés radiométriques de la région de Terre Neuve						N°:12-E ( 1 / 1 )
Station (m)	Lecture (cps)	Station (m)	Lecture (cps)	Station (m)	Lecture (cps)	Validation des données
<b>0000.0 – N</b>	<b>54</b>	<b>0250.0 – N</b>	<b>20</b>	<b>0500.0 - N</b>	<b>20</b>	
0012.5 – N	54	062.5 – N	22	0512.5 - N	24	
<b>0025.0 – N</b>	<b>58</b>	<b>0275.0 – N</b>	<b>20</b>	<b>0525.0 - N</b>	<b>22</b>	
0.037.5 – N	54	0.287.5 – N	22	0.537.5 - N	18	
<b>0050.0 – N</b>	<b>54</b>	<b>0300.0 – N</b>	<b>20</b>	<b>0550.0 - N</b>	<b>16</b>	
0062.5 – N	36	0312.5 – N	22	0662.5 - N	16	
<b>0075.0 – N</b>	<b>36</b>	<b>0325.0 – N</b>	<b>20</b>	<b>0575.0 - N</b>	<b>16</b>	
0087.5 – N	36	0337.5 – N	22	0587.5 - N	24	
<b>0100.0 – N</b>	<b>32</b>	<b>0350.0 – N</b>	<b>22</b>	<b>0600.0 - N</b>	<b>26</b>	
0112.5 – N	32	0362.5 – N	36	0612.5 - N	24	
<b>0125.0 – N</b>	<b>30</b>	<b>0375.0 – N</b>	<b>36</b>	<b>0625.0 - N</b>	<b>24</b>	
0137.5 – N	22	0387.5 – N	36	0637.5 - N	26	
<b>0150.0 – N</b>	<b>24</b>	<b>0400.0 – N</b>	<b>24</b>	<b>0650.0 - N</b>	<b>26</b>	
0162.5 – N	28	0412.5 – N	34	0662.5 - N	18	
<b>0175.0 – N</b>	<b>30</b>	<b>0425.0 – N</b>	<b>34</b>	<b>0675.0 - N</b>	<b>20</b>	
0187.5 – N	24	0437.5 – N	20	0687.5 - N	34	
<b>0200.0 – N</b>	<b>22</b>	<b>0450.0 – N</b>	<b>18</b>	<b>0700.0 - N</b>	<b>28</b>	
0212.5 – N	24	0462.5 – N	20	0712.5 - N	N/A	
<b>0225.0 – N</b>	<b>22</b>	<b>0475.0 – N</b>	<b>18</b>	<b>0725.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0237.5 – N	22	0487.5 – N	18	0737.5 - N	N/A	
<b>0250.0 – N</b>	<b>20</b>	<b>0500.0 – N</b>	<b>20</b>	<b>0750.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
<b>Note :</b> L'enregistrement des données est fait avec un magnétomètre de marque Scintrex BGS-ISL. L'unité de mesure est le <b>cps</b> qui signifie <b>scintillement / seconde</b> .						Date: 2018
Liens avec fiche N° : <b>Aucun</b>						
Fiche complétée par : Valentino Nelson & William Colas						

<b>SODEMINE, S.A.</b>						<b>Ligne</b>
<b>Levés radiométriques de la région de Terre Neuve</b>						<b>N°:13-E</b>
						<b>( 1 / 2 )</b>
Station (m)	Lecture (cps)	Station (m)	Lecture (cps)	Station (m)	Lecture (cps)	Validation des données
<b>0000.0 – N</b>	<b>28</b>	<b>0250.0 – N</b>	<b>26</b>	<b>0500.0 - N</b>	<b>16</b>	
0012.5 – N	28	062.5 – N	30	0512.5 - N	16	
<b>0025.0 – N</b>	<b>34</b>	<b>0275.0 – N</b>	<b>26</b>	<b>0525.0 - N</b>	<b>16</b>	
0.037.5 –N	32	0.287.5 –N	22	0.537.5 - N	16	
<b>0050.0 – N</b>	<b>32</b>	<b>0300.0 – N</b>	<b>24</b>	<b>0550.0 - N</b>	<b>30</b>	
0062.5 – N	34	0312.5 – N	22	0662.5 - N	24	
<b>0075.0 – N</b>	<b>42</b>	<b>0325.0 – N</b>	<b>22</b>	<b>0575.0 - N</b>	<b>24</b>	
0087.5 – N	40	0337.5 – N	20	0587.5 - N	22	
<b>0100. 0 –N</b>	<b>38</b>	<b>0350. 0 –N</b>	<b>22</b>	<b>0600. 0 - N</b>	<b>30</b>	
0112.5 – N	36	0362.5 – N	22	0612.5 - N	16	
<b>0125.0 – N</b>	<b>40</b>	<b>0375.0 – N</b>	<b>28</b>	<b>0625.0 - N</b>	<b>20</b>	
0137.5 – N	44	0387.5 – N	28	0637.5 - N	22	
<b>0150.0 – N</b>	<b>38</b>	<b>0400.0 – N</b>	<b>28</b>	<b>0650.0 - N</b>	<b>24</b>	
0162.5 – N	36	0412.5 – N	24	0662.5 - N	24	
<b>0175.0 – N</b>	<b>30</b>	<b>0425.0 – N</b>	<b>22</b>	<b>0675.0 - N</b>	<b>20</b>	
0187.5 – N	28	0437.5 – N	18	0687.5 - N	22	
<b>0200.0 – N</b>	<b>30</b>	<b>0450.0 – N</b>	<b>18</b>	<b>0700.0 - N</b>	<b>30</b>	
0212.5 – N	34	0462.5 – N	20	0712.5 - N	<b>N/A</b>	
<b>0225.0 – N</b>	<b>24</b>	<b>0475.0 – N</b>	<b>18</b>	<b>0725.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
0237.5 – N	22	0487.5 – N	16	0737.5 - N	<b>N/A</b>	
<b>0250.0 – N</b>	<b>26</b>	<b>0500.0 – N</b>	<b>16</b>	<b>0750.0 - N</b>	<b>N/A</b>	
<b>Note :</b> L'enregistrement des données est fait avec un magnétomètre de marque Scintrex BGS-1SL. L'unité de mesure est le <b>cps</b> qui signifie <b>scintillement / seconde.</b>						Date: 2018
Liens avec fiche N° : <b>Aucun</b>						
Fiche complétée par : Valentino Nelson & William Colas						

### D.3 ÉCHANTILLONNAGES & LEVÉS GÉOPHYSIQUES

SODEMINE, S.A.					RAPPORT
Échantillonnage de roches de la région de Terre Neuve					N°:C-2018 1 / 49
No. (Échantillon)	UTM Est	UTM Nord	Au (ppm)	Indice altération	DESCRIPTION
T-001	73 16 10	216 92 09	0.06	120	Gris; grains fins; quelques porphyres de feldspath.
T-002	73 11 73	216 94 58	0.07	140	Pourpre.
T-003	73 12 13	217 03 27	0.04	120	Pourpre.
T-004	73 13 27	217 00 15	0.04	100	Volcaniques altérées ou intrusives felsiques; veinules de quartz.
T-005	73 17 70	216 98 46	0.05	310	Gris; grains fins; quelques porphyres de feldspath.
T-006	73 23 23	216 92 95	0.03	100	Volcaniques bien lessivées, brunâtre; recoupé par des veines de quartz; non magnétique.
T-007	73 25 38	216 90 49	0.05	110	Lessivée, brùnâtre-verdâtre; grain relativement fin équigranulaire; non magnétique.
T-008	73 28 10	216 89 24	0.06	120	Bien lessivée; gris verdâtre; légèrement magnétique.
T-009	73 31 99	216 91 07	0.07	110	Gris verdâtre; grain relativement fin, équigranulaire; bien magnétique.
T-010	73 36 41	216 88 44	0.05	110	Gris; grain moyen équigranulaire; feldspath et pyroxène; légèrement magnétique.
T-011	73 42 73	216 86 43	0.05	110	Gris-verdâtre; équigranulaire grain fin-moyen; légèrement magnétique.
T-012	73 46 48	216 83 05	0.03	110	Lessivé verdâtre-grisâtre; grain moyen; à feldspath et pyroxène; non-magnétique.
T-013	73 50 78	216 82 21	0.22	550	Calcaire et chert.
T-014	73 55 79	216 80 38	0.05	120	Pourpre; non magnétique.
T-015	73 50 37	216 79 81	0.06	-1	Roche très lessivée et limonitisée, méconnaissable.

**Note :** La série d'échantillons **T** est le levé géochimique régional de roches. La série d'échantillons **HAI-R** est le levé d'indices minéralisés régional. La valeur accordée aux résultats d'analyse sous la limite de détection est 0. La valeur absente se note par **N/A**. Échantillonnage et validation des données réalisés par Valentino Nelson et J. W. Colas pour les comptes de SODEMINE (2018).

SODEMINE, S.A.					RAPPORT
Échantillonnage de roches de la région de Terre Neuve					N°:C-2018 2 / 49
No. (Échantillon)	UTM Est	UTM Nord	Au (ppm)	Indice altération	DESCRIPTION
T-016	73 44 60	216 78 31	0.03	120	Gris; grains relativement fins; petits porphyres de feldspath blanc dans une matrice grise fine; non-magnétique.
T-017	73 42 99	216 74 06	0.02	140	Gris pourpre; légèrement magnétique
T-018	73 48 83	216 71 67	0.04	140	Pourpre.grains relativement fins (matrice pourpre) avec orphyres de pyroxène altérés; non magnétique.
T-019	73 53 48	216 74 16	0.04	320	Porphyre (?) à feldspath et quartz; pâte feldspathique verdâtre avec petits grains de magnétite; roche relativement bien magnétique.
T-020	73 56 24	216 71 74	0.04	310	Blanc; grains moyens; pratiquement équigranulaire; à feldspath et quartz; un peu d'amphibole; non-magnétique
T-021	73 36 88	216 76 16	0.02	110	Gris; grains moyens; équigranulaire; à petits cristaux de feldspath dans une matrice fine grise; non-magnétique
T-022	73 33 45	216 79 75	0.02	110	Gris-rougeâtre; grains moyens; équigranulaire; à feldspath et pyroxène; non-magnétique
T-023	73 39 49	216 84 41	0.02	110	Lessivée, brùnâtre-verdâtre; grain relativement fin équigranulaire; non magnétique.
T-024	73 41 39	216 83 01	0.02	110	Gris verdâtre; grain relativement fin, pratiquement équigranulaire; bien magnétique.
T-025	73 34 60	216 85 55	0.00	110	Gris; grain moyen équigranulaire; à feldspath et pyroxène; légèrement magnétique.
T-026	73 29 38	216 85 81	0.02	120	Gris-verdâtre; équigranulaire grain fin-moyen; légèrement magnétique.
T-027	73 28 89	216 82 36	0.03	110	Lessivé verdâtre-grisâtre; grain moyen, pratiquement équigranulaire; à feldspath et pyroxène; non-magnétique.

**Note :** La série d'échantillons **T** est le levé géochimique régional de roches. La série d'échantillons **HAI-R** est le levé d'indices minéralisés régional. La valeur accordée aux résultats d'analyse sous la limite de détection est 0. La valeur absente se note par **N / A**. Échantillonnage et validation des données réalisés par Valentino Nelson et J. W. Colas pour les comptes de SODEMINE (2018).

SODEMINE, S.A.					RAPPORT
Échantillonnage de roches de la région de Terre Neuve					N°:C-2018 3 / 49
No. (Échantillon)	UTM Est	UTM Nord	Au (ppm)	Indice altération	DESCRIPTION
T-028	73 32 47	216 77 42	0	110	Recoupé par des veines de quartz; andésite altérée (silicifiée) gris à pourpre; quelques faibles taches de malachite; légèrement magnétique.
T-029	73 29 81	216 73 06	0.03	110	Gris foncé; grain relativement fin; petits porphyres de feldspath blancs dans matrice fine gris foncé à noir; modérément magnétique.
T-030	73 27 12	216 74 20	0.03	140	Pourpre; relativement larges cristaux de pyroxène (jusqu'à 3-4 mm.) avec petits porphyres de feldspath dans une matrice rougeâtre à grain fin.
T-031	73 20 96	216 75 43	0.02	-1	Veine de quartz et jaspe.
T-032	73 20 61	216 67 55	0.02	110	Andésite (?) altérée brunâtre, grisâtre et rosé; recoupé par des veines de quartz; altération vert brillant; légèrement magnétique.
T-033	73 26 09	216 65 76	0.03	120	Gris pourpre; un peu de pyroxène; non-magnétique.
T-034	73 21 41	216 64 62	0.03	110	Lessivé gris pourpre pâle; grain moyen équigranulaire; à feldspath et pyroxène; non-magnétique.
T-035	73 28 33	216 63 80	0.02	140	Rougeâtre; matrice bien fine avec quelques petits porphyres de pyroxène; faibles taches de malachite le long de fractures; relativement bien magnétique.
T-036	73 29 46	216 59 77	0.03	110	Gris pourpre; grain fin-moyen équigranulaire; non-magnétique.
T-037	73 31 81	216 64 48	0.04	110	Pourpre; grain fin-moyen équigranulaire; quelques taches de carbonates et de sulfates de Cu; légèrement magnétique.
T-038	73 25 02	216 62 38	0.03	110	Gris pourpre; relativement fin; équigranulaire; petits porphyres de feldspath; non-magnétique.

**Note :** La série d'échantillons **T** est le levé géochimique régional de roches. La série d'échantillons **HAI-R** est le levé d'indices minéralisés régional. La valeur accordée aux résultats d'analyse sous la limite de détection est 0. La valeur absente se note par **N / A**. Échantillonnage et validation des données réalisés par Valentino Nelson et J. W. Colas pour les comptes de SODEMINE (2018).

SODEMINE, S.A.					RAPPORT
Échantillonnage de roches de la région de Terre Neuve					N°:C-2018 3 / 49
No. (Échantillon)	UTM Est	UTM Nord	Au (ppm)	Indice altération	DESCRIPTION
T-039	73 20 76	216 59 50	0.04	110	Gris pourpre; relativement fin, équigranulaire; non-magnétique.
T-040	73 18 81	216 57 08	0.05	110	Gris pourpre; grain moyen, équigranulaire; à feldspath et pyroxène; modérément magnétique.
T-041	73 19 45	216 62 58	0.07	120	Pourpre; grain relativement fin; fragments angulaires de 120 gris vert (brèche) dans une matrice d'andésite pourpre; non-magnétique.
T-042	73 13 10	216 64 54	0.05	120	Pourpre; grain relativement fin; légèrement magnétique.
T-043	73 12 64	216 69 03	0.04	110	Gris brun; grain moyen équigranulaire; relativement bien magnétique.
T-044	73 17 21	216 71 55	0.05	120	Pourpre; grain relativement fin; contient zones tachetées de malachite; non-magnétique.
T-045	73 21 13	216 78 54	0	130	Pourpre; relativement larges porphyres de pyroxène (jusqu'à 3-4 mm.); non-magnétique.
T-046	73 24 83	216 84 22	0.04	110	Gris brunâtre; grain relativement fin; peu magnétique.
T-047	73 27 01	216 87 14	0.02	110	Gris brunâtre; grain relativement fin; relativement bien magnétique.
T-048	73 23 91	216 86 67	0.05	110	Recoupé par 310; andésite vert brunâtre à grain fin; 310 à grain moyen-grossier équigranulaire; à feldspath, quartz, amphibole; non-magnétique.
T-049	73 17 20	216 84 65	0.04	110	110 (?) ou 310 (?) gris brunâtre; grain moyen équigranulaire; à feldspath et amphibole et/ou pyroxène; non magnétique.
T-050	73 12 30	216 86 54	0.02	100	Matrice très fine gris foncé avec porphyres de pyroxène dispersés; faiblement magnétique.

**Note :** La série d'échantillons **T** est le levé géochimique régional de roches. La série d'échantillons **HAI-R** est le levé d'indices minéralisés régional. La valeur accordée aux résultats d'analyse sous la limite de détection est 0. La valeur absente se note par **N / A**. Échantillonnage et validation des données réalisés par Valentino Nelson et J. W. Colas pour les comptes de SODEMINE (2018).

SODEMINE, S.A.					RAPPORT
Échantillonnage de roches de la région de Terre Neuve					N°:C-2018 4 / 49
No. (Échantillon)	UTM Est	UTM Nord	Au (ppm)	Indice altération	DESCRIPTION
T-051	73 17 40	217 07 49	0	130	Andésite (?) lessivée blanchâtre; non-magnétique.
T-052	73 16 39	217 12 50	0.02	120	Andésite (?) lessivée blanchâtre; certains minéraux lessivés et colorés par de la limonite; non-magnétique.
T-053	73 14 35	217 18 35	0	110	Gris verdâtre; grain relativement fin; non-magnétique.
T-054	73 16 35	217 23 85	0	110	Gris pourpre; grain relativement fin; non-magnétique.
T-055	73 20 19	217 20 87	0	310	Rose; grain moyen équi-granulaire; fait surtout de feldspath et quartz; un peu d'amphibole.
T-056	73 24 90	217 17 96	0	120	Pourpre; non-magnétique.
T-057	73 21 81	217 15 34	0	120	Pourpre; non-magnétique.
T-058	73 25 81	217 12 59	0.05	110	Grisâtre; grain moyen, pratiquement équi-granulaire; à feldspath et pyroxène; non-magnétique.
T-059	73 24 77	217 07 76	0	110	Gris moyen; grain fin-moyen, équi-granulaire; non-magnétique.
T-060	73 22 83	217 01 49	0.05	300	Roches intrusives (?) à grain fin-moyen, équi-granulaire; rosé; fait surtout de feldspath; fractures limonitisées; non-magnétique.
T-061	73 27 33	216 97 15	0.06	110	Gris; grain fin-moyen, équi-granulaire; de modérément à relativement bien magnétique.
T-062	73 29 00	217 03 67	0.03	110	Non-magnétique
T-063	73 28 30	217 06 35	0.03	110	Vert grisâtre; un peu de magnétite.

**Note :** La série d'échantillons **T** est le levé géochimique régional de roches. La série d'échantillons **HAI-R** est le levé d'indices minéralisés régional. La valeur accordée aux résultats d'analyse sous la limite de détection est 0. La valeur absente se note par **N/A**. Échantillonnage et validation des données réalisés par Valentino Nelson et J. W. Colas pour les comptes de SODEMINE (2018).

SODEMINE, S.A.					RAPPORT
Échantillonnage de roches de la région de Terre Neuve					N°:C-2018 5 / 49
No. (Échantillon)	UTM Est	UTM Nord	Au (ppm)	Indice altération	DESCRIPTION
T-064	73 31 56	217 07 54	0.05	100	Pourpre et verdâtre; grain fin-moyen; apparemment vésiculaire; non-magnétique.
T-065	73 32 32	217 11 04	0.02	120	Pourpre; quelques cristaux de pyroxène; non-magnétique.
T-066	73 38 11	217 08 12	0	120	Gris; non-magnétique.
T-067	73 42 98	217 01 15	0	120	Pourpre; non-magnétique.
T-068	73 37 40	216 98 65	0.02	110	Andésite (?) bien lessivée avec minéraux altérés et colorés par la limonite.
T-069	73 34 14	216 94 00	0.04	300	Intrusive (?) rosé à grain relativement fin; roche +/- limonitisée; non-magnétique.
T-070	73 40 37	216 89 88	0.06	-1	Roche fortement lessivée et limonitisée; méconnaissable.
T-071	73 42 27	216 93 36	0.02	140	Gris, lessivé.
T-072	73 47 33	216 97 30	0	120	Gris pâle; porphyres faits de feldspath surtout; un peu d'amphibole; matrice fine; non-magnétique.
T-073	73 48 54	216 89 94	0.03	300	Intrusive (?) bien lessivée et limonitisée; semble surtout composée de feldspath; non-magnétique.
T-074	73 55 47	216 88 97	0	120	Pourpre; non-magnétique.
T-075	73 58 74	216 83 17	0	120	Pourpre; non-magnétique.
T-076	73 48 38	216 86 17	0.02	-1	Roche bien lessivée et limonitisée; gris rosé pâle; grain relativement fin; roche méconnaissable; non-magnétique.
T-077	73 35 11	216 69 68	0.04	120	Pourpre; quelques porphyres de pyroxène; non-magnétique.

**Note :** La série d'échantillons **T** est le levé géochimique régional de roches. La série d'échantillons **HAI-R** est le levé d'indices minéralisés régional. La valeur accordée aux résultats d'analyse sous la limite de détection est 0. La valeur absente se note par **N/A**. Échantillonnage et validation des données réalisés par Valentino Nelson et J. W. Colas pour les comptes de SODEMINE (2018).

SODEMINE, S.A.					RAPPORT
Échantillonnage de roches de la région de Terre Neuve					N°:C-2018 6 / 49
No. (Échantillon)	UTM Est	UTM Nord	Au (ppm)	Indice altération	DESCRIPTION
T-078	73 35 49	216 85 82	0.05	320	Matrice verte; à grain très fin; porphyres de feldspath rose jusqu'à 3 mm; quelques porphyres de quartz (?).
T-079	73 46 24	216 64 02	0.05	120	Gris; légèrement magnétique.
T-080	73 49 39	216 65 12	0.03	120	Gris verdâtre, parfois pourpre; quelques cristaux de pyroxène altérés; un peu d'altération vert brillant.
T-081	73 53 31	216 63 95	0.03	120	Gris; grain relativement fin.
T-082	73 52 36	216 68 29	0.04	140	Gris +/- pourpre ou vert; grain relativement fin; quelques porphyres de pyroxène.
T-083	73 58 42	216 65 89	0.06	140	Grain moyen, pratiquement équigranulaire; altération vert brillant de certains minéraux; quelques grains noirs de magnétite et/ou chalcosine (trop petits et dispersés pour être identifiés).
T-084	73 57 79	216 63 28	0.05	120	Gris pâle verdâtre, lessivé; peut-être un peu de pyroxène; non-magnétique.
T-085	73 63 64	216 67 31	0.06	140	Grisâtre; non-magnétique.
T-086	73 38 97	216 79 32	0.03	140	Grisâtre; non-magnétique.
T-087	73 11 50	217 13 44	0	110	Gris, grain fin-moyen équigranulaire.
T-088	73 04 79	217 12 62	0.03	110	Gris brunâtre; aphanitique.
T-089	73 11 12	217 22 13	0	130	Gris pourpre; grain moyen.
T-090	73 13 23	217 07 31	0.06	310	310 (?) ou 120 (?); grain moyen-grossier; porphyres de feldspath blanc abondant, avec amphibole en quantité moindre; un peu de quartz.

**Note :** La série d'échantillons **T** est le levé géochimique régional de roches. La série d'échantillons **HAI-R** est le levé d'indices minéralisés régional. La valeur accordée aux résultats d'analyse sous la limite de détection est 0. La valeur absente se note par **N/A**. Échantillonnage et validation des données réalisés par Valentino Nelson et J. W. Colas pour les comptes de SODEMINE (2018).

SODEMINE, S.A.					RAPPORT
Échantillonnage de roches de la région de Terre Neuve					N°:C-2018 7 / 49
No. (Échantillon)	UTM Est	UTM Nord	Au (ppm)	Indice altération	DESCRIPTION
T-091	73 19 24	217 02 80	0.06	310	310 (?) ou 120 (?); grain moyen-grossier; de feldspath blanc abondant, avec amphibole en quantité moindre; un peu de quartz.
T-092	73 18 73	216 89 48	0	110	Gris brunâtre lessivé; grain fin-moyen équigranulaire; traversé par veines de quartz; un peu de limonite dans fractures et porosité.
T-093	73 24 29	216 79 50	0	140	Gris pourpre; matrice à grain fin-moyen avec quelques porphyres de pyroxène altérés.
T-094	73 24 67	216 71 83	0	140	Gris pourpre; matrice à grain fin-moyen avec quelques porphyres de pyroxènes altérés.
T-095	73 18 04	216 66 97	0.04	120	Pourpre; porphyres principalement faits de feldspath blanc grisâtre, avec un peu de pyroxène.
T-096	73 23 48	216 57 95	0.04	120	Pourpre; porphyres principalement faits de feldspath blanc grisâtre, avec un peu de pyroxène.
T-097	73 49 64	216 74 54	0.08	140	Matrice fine vert brunâtre avec porphyres particulièrement grossier de feldspath blanchâtre et de pyroxène noir verdâtre.
T-098	73 51 03	216 91 04	0.06	120	Pourpre; porphyres surtout faits de feldspath blanc; avec un peu de pyroxène altéré et rare biotite.
T-099	73 58 73	216 78 01	0.04	120	Gris pourpre pâle, porphyre de feldspath blanc; grain moyen-grossier.
T-100	73 62 15	216 76 00	0.06	120	Gris pourpre pâle, porphyre de feldspath blanc; grain moyen-grossier.
T-101	73 65 72	216 66 18	0.06	120	Matrice gris pâle avec porphyres de feldspath blanc; grain moyen-grossier.

**Note :** La série d'échantillons **T** est le levé géochimique régional de roches. La série d'échantillons **HAI-R** est le levé d'indices minéralisés régional. La valeur accordée aux résultats d'analyse sous la limite de détection est 0. La valeur absente se note par **N/A**. Échantillonnage et validation des données réalisés par Valentino Nelson et J. W. Colas pour les comptes de SODEMINE (2018).

SODEMINE, S.A.					RAPPORT
Échantillonnage de roches de la région de Terre Neuve					N°:C-2018 8 / 49
No. (Échantillon)	UTM Est	UTM Nord	Au (ppm)	Indice altération	DESCRIPTION
T-102	72 48 62	217 12 76	0.06	110	Grisâtre +/- lessivé; grain fin-moyen; à feldspath et pyroxène; vésiculaire.
T-103	72 44 04	217 14 01	0.05	120	Pourpre; petits porphyres de feldspath blanc; bien vésiculaire.
T-104	72 47 40	217 19 63	0.05	120	Matrice brunâtre ; petits porphyres de feldspath blanc.
T-105	72 43 40	217 20 57	0	110	110 (?); roche à grain fin équigranulaire; bien lessivée beige.
T-106	72 39 39	217 19 10	0.03	110	Lessivée brunâtre; grain fin équigranulaire.
T-107	72 35 04	217 18 01	0.02	110	Gris brunâtre lessivée; grain moyen équigranulaire.
T-108	72 71 40	217 48 67	0	110	Gris vert, grain fin à moyen.
T-109	72 66 37	217 52 48	0.02	110	Grain moyen à grossier; magnétique; un peu de quartz; 1% chalcopryrite.
T-110	72 62 59	217 54 43	0.04	110	Brun; grain fin à moyen; faiblement magnétique.
T-111	72 59 48	217 48 73	0.02	120	Pourpre; porphyres de feldspath et quartz.
T-112	72 56 99	217 53 63	0	110	Brunâtre; grain fin à moyen; faiblement magnétique; 5 à 7% minéraux opaques.
T-113	72 58 43	217 58 13	0	350	Roche ultramafique (diabase); noirâtre avec des cristaux de quartz, pyroxène et feldspath.
T-114	72 57 34	217 61 75	0	110	Gris blanchâtre; grain fin à moyen; magnétique; 3 à 5% de minéraux opaques.
T-115	72 52 85	217 64 94	0.02	110	Lessivé, brunâtre; grain fin à moyen; matériel non-consolidé.
T-116	72 50 79	217 59 53	0.02	110	Gris-brun; grain fin, équigranulaire; faiblement magnétique.

**Note :** La série d'échantillons **T** est le levé géochimique régional de roches. La série d'échantillons **HAI-R** est le levé d'indices minéralisés régional. La valeur accordée aux résultats d'analyse sous la limite de détection est 0. La valeur absente se note par **N / A**. Échantillonnage et validation des données réalisés par Valentino Nelson et J. W. Colas pour les comptes de SODEMINE (2018).

SODEMINE, S.A.					RAPPORT
Échantillonnage de roches de la région de Terre Neuve					N°:C-2018 9 / 49
No. (Échantillon)	UTM Est	UTM Nord	Au (ppm)	Indice altération	DESCRIPTION
T-117	72 53 16	217 53 50	0.02	120	Gris-brun; grain fin, équi-granulaire; vésivulaire; porphyre isolé de feldspath.
T-118	72 47 89	217 53 40	0.04	120	Gris-brun; grain fin à moyen, légèrement magnétique; porphyres de feldspath.
T-119	72 44 78	217 60 81	0.03	320	Lessivé; plus de porphyres de quartz et de feldspath.
T-120	72 47 95	217 59 42	0.02	110	Gris-brun; grain fin, équi-granulaire; quartz et calcite dans les fractures.
T-121	72 49 14	217 64 03	0.02	310	Gabbro-diorite (association quartzo-feldspathique), pyroxène-amphibole allongés.
T-122	72 46 35	217 67 41	0.02	110	Gris-brunâtre; grain moyen, équi-granulaire.
T-123	72 48 02	217 71 91	0.04	110	Gris-brunâtre; grain moyen, équi-granulaire.
T-124	72 50 46	217 71 51	0.04	110	Gris-brunâtre; grain moyen, équi-granulaire.
T-125	72 44 69	217 76 94	0.02	120	Matrice brunâtre; grain fin à moyen, porphyres de feldspath et de quartz.
T-126	72 37 54	217 77 34	0.02	120	Gris-brun; grain moyen, équi-granulaire.
T-127	72 36 73	217 73 58	0.02	120	Grain fin, équi-granulaire dense; porphyres de feldspath.
T-128	72 41 87	217 69 38	0	130	Gris, grain moyen; plus de porphyres de feldspath que de pyroxène; un peu de quartz.
T-129	73 01 79	217 40 78	0.04	132	Gris moyen; avec des grains particuliers de quartz; magnétique.
T-130	73 01 94	217 46 51	0	160	Grain moyen à grossier; sédiments remaniés à l'intérieur de l'assemblage volcanique.
T-131	73 09 14	217 54 41	0	420	Roche métasomatisée; assemblage calco-silicaté à épidote, ématite, magnétique, quartz et calcite.

**Note :** La série d'échantillons **T** est le levé géochimique régional de roches. La série d'échantillons **HAI-R** est le levé d'indices minéralisés régional. La valeur accordée aux résultats d'analyse sous la limite de détection est 0. La valeur absente se note par **N / A**. Échantillonnage et validation des données réalisés par Valentino Nelson et J. W. Colas pour les comptes de SODEMINE (2018).

SODEMINE, S.A.					RAPPORT
Échantillonnage de roches de la région de Terre Neuve					N°:C-2018 10 / 49
No. (Échantillon)	UTM Est	UTM Nord	Au (ppm)	Indice altération	DESCRIPTION
T-132	73 03 15	217 5505	0	320	Brun pâle; plus de matériel quartzeux et feldspathique.
T-133	73 05 50	217 36 10	0	310	Prédominance de feldspath, un peu de quartz, beaucoup de pyroxène, biotite, magnétite.
T-134	72 78 07	217 73 84	0	110	Volcanoclastite (brèche); prédominance d'éléments volcaniques anguleux; matrice à grain fin.
T-135	72 84 68	217 76 28	0	110	Gris-vert; grain fin à moyen; magnétique.
T-136	72 88 88	217 75 80	0.02	110	Volcanoclastite (brèche); prédominance d'éléments volcaniques anguleux; matrice à grain fin.
T-137	72 93 28	217 75 17	0.02	120	Pourpre; grain moyen à grossier; magnétique; 10 à 15% malachite.
T-138	72 97 40	217 76 03	0	124	Grain moyen; porphyres de feldspath; 25 à 30% malachite; magnétique.
T-139	72 95 88	217 79 24	0	120	Grain fin à moyen; vésiculaire; légèrement magnétique.
T-140	72 92 17	217 78 49	0	320	Abondance de quartz et de minéraux ferromagnésiens.
T-141	72 88 43	217 79 55	0	132	Grain fin à moyen; abondance de porphyres de pyroxène; altération de malachite.
T-142	72 86 14	217 78 76	0	320	Grain grossier; surabondance de feldspath; un peu de malachite.
T-143	72 79 57	217 77 34	0	120	Grain moyen; porphyres de feldspath particulièrement grossier.

**Note :** La série d'échantillons **T** est le levé géochimique régional de roches. La série d'échantillons **HAI-R** est le levé d'indices minéralisés régional. La valeur accordée aux résultats d'analyse sous la limite de détection est 0. La valeur absente se note par **N / A**. Échantillonnage et validation des données réalisés par Valentino Nelson et J. W. Colas pour les comptes de SODEMINE (2018).

SODEMINE, S.A.					RAPPORT
Échantillonnage de roches de la région de Terre Neuve					N°:C-2018 11 / 49
No. (Échantillon)	UTM Est	UTM Nord	Au (ppm)	Indice altération	DESCRIPTION
T-144	72 73 22	217 78 08	0	130	Grain moyen; porphyres de pyroxène et de feldspath; 5 à 7% malachite.
T-145	72 47 16	218 07 10	0	130	Grain fin au centre et grain moyen à l'aurole; porphyres de pyroxène et de feldspath.
T-146	72 44 66	218 11 78	0	120	Grain fin à moyen; majoritairement porphyres de feldspath; magnétique.
T-147	72 51 86	218 04 66	0.03	320	Gris; grain moyen; prédominance de feldspath.
T-148	72 55 62	218 00 94	0.03	130	Pourpre; grain moyen; abondance de quartz; magnétique; 5-7% malachite.
T-149	71 82 40	217 76 80	0	120	Pourpre; grain fin, équi-granulaire; porphyres de feldspath; vésiculaire.
T-150	71 80 69	217 86 17	0.02	120	Gris-vert; grain fin à moyen; prédominance de feldspath.
T-151	71 77 16	217 86 43	0	120	Gris-pourpre; grain fin à moyen; prédominance de feldspath.
T-152	71 76 19	217 82 16	0.03	120	Gris-pourpre; grain fin, équi-granulaire; porphyres de feldspath.
T-153	71 71 34	217 86 30	0.02	120	Grisâtre; grain fin, équi-granulaire; magnétique; limonite dans les fractures.
T-154	72 16 91	217 84 79	0.03	322	Brunâtre; prédominance de feldspath; magnétique.
T-155	72 19 94	217 81 41	0	122	Pourpre; matrice à grain fin; porphyres de feldspath particulièrement grossier.
T-157	72 24 13	217 72 13	0.04	122	Pourpre; grain fin, équi-granulaire; porphyres de feldspath particulièrement grossier.
T-158	72 20 19	217 77 31	0	122	Pourpre; grain fin à moyen; porphyres isolés de feldspath et de quartz.

**Note :** La série d'échantillons **T** est le levé géochimique régional de roches. La série d'échantillons **HAI-R** est le levé d'indices minéralisés régional. La valeur accordée aux résultats d'analyse sous la limite de détection est 0. La valeur absente se note par **N/A**. Échantillonnage et validation des données réalisés par Valentino Nelson et J. W. Colas pour les comptes de SODEMINE (2018).

SODEMINE, S.A.					RAPPORT
Échantillonnage de roches de la région de Terre Neuve					N°:C-2018 12 / 49
No. (Échantillon)	UTM Est	UTM Nord	Au (ppm)	Indice altération	DESCRIPTION
T-159	72 17 99	217 72 31	0	312	Grain grossier; un peu de biotite; magnétique.
T-160	72 15 36	217 69 30	0.02	120	Gris; grain fin à moyen; fortement magnétique.
T-161	72 07 85	217 73 08	0	162	Assemblage de matériel volcanique, avec majoritairement des porphyres de feldspath.
T-162	72 01 39	217 72 86	0.04	130	Grain fin, équigranulaire; porphyres de feldspath particulièrement grossier.
T-163	73 11 35	217 33 91	0.04	132	Grain moyen; porphyres de pyroxène (dominant) et de feldspath.
T-164	73 18 05	217 30 40	0.02	322	Porphyre avec feldspath et quartz.
T-165	73 17 30	217 27 10	0.02	132	Grain grossier; magnétique.
T-166	73 19 85	217 32 17	0.04	132	Pourpre; grain fin; magnétique.
T-167	72 74 91	217 41 08	0.03	110	Grain fin; porphyres de feldspath isolés.
T-168	72 67 86	217 44 89	0.03	110	Grain fin; porphyres de feldspath particulièrement grossier.
T-169	72 80 87	217 39 19	0.04	120	Porphyres de pyroxène grossier; magnétique.
T-170	72 24 10	217 68 11	0.03	130	Porphyres de feldspath et de pyroxène; magnétique.
T-171	72 13 65	217 70 45	0.03	100	Volcanique à grain moyen et à matrice fine; roche altérée; recoupé par des petites veinules de quartz et calcite.
T-172	72 28 63	217 83 97	0.04	110	Grain fin; patine d'altération blanchâtre; porphyres de feldspath grossier.
T-177	72 74 50	217 53 33	0.02	130	Beige; matrice fine avec porphyres de feldspath et pyroxène en quantité presque égale.

**Note :** La série d'échantillons **T** est le levé géochimique régional de roches. La série d'échantillons **HAI-R** est le levé d'indices minéralisés régional. La valeur accordée aux résultats d'analyse sous la limite de détection est 0. La valeur absente se note par **N / A**. Échantillonnage et validation des données réalisés par Valentino Nelson et J. W. Colas pour les comptes de SODEMINE (2018).

SODEMINE, S.A.					RAPPORT
Échantillonnage de roches de la région de Terre Neuve					N°:C-2018 13 / 49
No. (Échantillon)	UTM Est	UTM Nord	Au (ppm)	Indice altération	DESCRIPTION
T-178	72 78 52	217 51 75	0.03	130	Gris-brun; grain moyen avec porphyres de feldspath plus abondant que pyroxène; un peu de quartz.
T-179	72 82 79	217 53 36	0.07	130	Gris-brun; grain moyen avec porphyres de feldspath plus abondant que pyroxène; un peu de quartz.
T-180	72 83 51	217 48 38	0.03	130	Brun; grain moyen à grossier, avec porphyres de pyroxène plus abondant que feldspath.
T-181	72 86 20	217 50 10	0.03	130	Brun; grain moyen à grossier, avec porphyres de pyroxène plus abondant que feldspath.
T-182	72 99 48	217 58 38	0.03	120	Gris; grain fin, équi-granulaire; vésiculaire; porphyres de feldspath; un peu de quartz.
T-183	72 95 28	217 61 73	0.03	120	Gris-vert; grain moyen avec porphyres de feldspath particulièrement grossier.
T-184	73 03 63	217 60 35	0.03	120	Gris-vert; grain moyen avec porphyres de feldspath particulièrement grossier.
T-185	72 27 27	218 11 24	0.03	120	Brun; grain moyen, équi-granulaire; feldspath dominant; un peu de quartz.
T-186	72 25 75	218 04 04	0.03	310	Grain moyen à grossier; abondance de feldspath; un peu de malachite.
T-187	72 14 17	218 13 31	0	120	Brunâtre; matrice fine avec porphyres de feldspath isolés.
T-188	72 02 93	218 02 68	0	120	Brun; grain moyen; porphyres de feldspath plus abondant que pyroxène.
T-189	72 18 14	218 00 57	0.02	120	Brun; grain moyen; porphyres de feldspath plus abondant que pyroxène.
T-190	72 20 82	217 88 78	0.03	120	Brun; grain moyen; porphyres de feldspath plus abondant que pyroxène.

**Note :** La série d'échantillons **T** est le levé géochimique régional de roches. La série d'échantillons **HAI-R** est le levé d'indices minéralisés régional. La valeur accordée aux résultats d'analyse sous la limite de détection est 0. La valeur absente se note par **N/A**. Échantillonnage et validation des données réalisés par Valentino Nelson et J. W. Colas pour les comptes de SODEMINE (2018).

SODEMINE, S.A.					RAPPORT
Échantillonnage de roches de la région de Terre Neuve					N°:C-2018 14 / 49
No. (Échantillon)	UTM Est	UTM Nord	Au (ppm)	Indice altération	DESCRIPTION
T-191	74 08 43	216 74 43	0	120	Brunâtre; matrice fine avec porphyres de feldspath isolés.
T-192	74 11 06	216 82 14	0	320	Porphyre à quartz, avec malachite.
T-193	74 14 91	216 88 02	0	320	Porphyre à quartz, avec malachite.
T-194	74 18 30	216 87 50	0	320	Gris blanchâtre; porphyres de pyroxène isolés.
T-195	74 17 40	216 83 81	0.2	120	Gris; grain fin, équigranulaire, avec des concentrations de malachite.
T-196	74 18 19	216 77 51	0.2	120	Roche lessivée; grain fin, équigranulaire; limonite locale.
T-197	74 12 18	216 79 58	0	100	Gris vert; grain fin; fragment à texture très fine.
T-198	74 11 89	216 71 01	0.3	122	Gris-pourpre; grain moyen équigranulaire; porphyres de feldspath particulièrement grossier.
T-199	74 15 51	216 72 40	0	110	Gris-brun; grain moyen.
T-200	73 09 85	216 96 40	0	120	Andésite porphyrique pourpre.
T-201	73 08 16	217 01 72	0.4	300	Petite intrusion 300 lessivée dans 120; fractures hématisées.
T-202	73 06 46	217 05 86	0.3	120	Andésite porphyrique pourpre, relativement fin.
T-203	73 08 61	217 10 79	0.2	300	Souvent lessivé blanchâtre; frais=verdâtre; carbonatée; qq. petites veine quartz +/- carbonates; qq. grain de sulfures dans veines.
T-204	73 07 00	217 14 79	0.2	150	Volcaniques verdâtre.

**Note :** La série d'échantillons **T** est le levé géochimique régional de roches. La série d'échantillons **HAI-R** est le levé d'indices minéralisés régional. La valeur accordée aux résultats d'analyse sous la limite de détection est 0. La valeur absente se note par **N/A**. Échantillonnage et validation des données réalisés par Valentino Nelson et J. W. Colas pour les comptes de SODEMINE (2018).

SODEMINE, S.A.					RAPPORT
Échantillonnage de roches de la région de Terre Neuve					N°:C-2018 15 / 49
No. (Échantillon)	UTM Est	UTM Nord	Au (ppm)	Indice altération	DESCRIPTION
T-205	73 03 52	217 15 76	0.2	120	Relativement fin; lessivé.
T-206	73 00 62	217 08 62	0.2	124	Roche blanchâtre, craieuse; hématisation le long et en marge des fractures.
T-207	73 02 63	217 07 03	0.3	124	Similaire à T-206.
T-208	73 01 88	217 03 02	0.3	124	Similaire à T-206.
T-209	73 07 18	216 93 10	0	140	Pourpre; lessivée blanchâtre-rosé.
T-210	72 94 01	217 05 38	0	124	Bréchifiée, très altérée; hématisation distribuée irrégulièrement un peu partout.
T-211	72 94 99	217 07 08	0	124	Zones irrégulières hématisées; localement, pâle teinte de malachite.
T-212	72 96 09	217 11 98	0	124	Altération de modérée à intense, particulièrement le long de cisaillement étroits +/- limonitisés.
T-213	72 97 42	217 18 98	0.4	200	Andésite bien bréchifiée; fragments dans une matrice d'intrusive felsique.
T-214	73 04 00	217 19 11	0.02	120	Pourpre.
T-215	73 00 94	217 25 12	0	120	Pourpre.
T-216	73 07 46	217 22 28	0.03	120	Pourpre.
T-217	73 08 56	217 26 09	0.4	100	Volcanique gris verdâtre; grain fin; équigranulaire.
T-218	72 88 86	217 10 09	0.03	130	Gris; un peu de pyroxène.
T-219	72 88 25	217 12 85	0	120	Gris rosé.

**Note :** La série d'échantillons **T** est le levé géochimique régional de roches. La série d'échantillons **HAI-R** est le levé d'indices minéralisés régional. La valeur accordée aux résultats d'analyse sous la limite de détection est 0. La valeur absente se note par **N/A**. Échantillonnage et validation des données réalisés par Valentino Nelson et J. W. Colas pour les comptes de SODEMINE (2018).

SODEMINE, S.A.					RAPPORT
Échantillonnage de roches de la région de Terre Neuve					N°:C-2018 16 / 49
No. (Échantillon)	UTM Est	UTM Nord	Au (ppm)	Indice altération	DESCRIPTION
T-220	72 92 57	217 12 85	0	120	Gris; grain fin; qq. porphyres de feldspath; qq. veinules de carbonates.
T-221	72 94 95	217 19 74	0.04	120	Gris.
T-222	72 92 82	217 24 11	0.03	120	Gris.
T-223	72 92 89	217 27 11	0	160	Grès volcanique conglomératique.
T-224	72 97 25	217 27 80	0.03	120	Pourpre.
T-225	73 01 37	217 27 54	0.02	140	Pourpre; pyroxènes particulièrement grossier.
T-226	72 97 25	217 23 05	0.03	120	Pourpre.
T-227	73 13 53	216 95 66	0.02	114	Altération de modérée à intense; verdâtre, blanchâtre et rougeâtre (hématisé); radiométrie jusqu'à 90 c.p.s.
T-228	73 46 37	217 03 04	0.02	120	Andésite grisâtre porphyrique à feldspath, quartz et magnétite.
T-229	73 43 26	217 07 97	0	120	Andésite porphyrique grise (légèrement rosée) à feldspath.
T-230	73 44 80	217 16 30	0.02	100	Volcaniques grisâtre relativement fine, équigranulaire; lessivée et difficile à identifier.
T-231	73 50 08	217 19 84	0.02	160	Volcaniques (gabbro) gris foncé à noir; grain moyen.
T-400	73 50 35	216 72 12	0.05	202	Brun; grain moyen; assemblage volcaniques intrusives, à pyroxène et plagioclase.
T-401	73 59 15	216 67 03	0	312	Intrusive felsique +/- altérée; un peu de biotite.

**Note :** La série d'échantillons **T** est le levé géochimique régional de roches. La série d'échantillons **HAI-R** est le levé d'indices minéralisés régional. La valeur accordée aux résultats d'analyse sous la limite de détection est 0. La valeur absente se note par **N/A**. Échantillonnage et validation des données réalisés par Valentino Nelson et J. W. Colas pour les comptes de SODEMINE (2018).

SODEMINE, S.A.					RAPPORT
Échantillonnage de roches de la région de Terre Neuve					N°:C-2018 17 / 49
No. (Échantillon)	UTM Est	UTM Nord	Au (ppm)	Indice altération	DESCRIPTION
T-402	73 65 80	216 60 16	0	102	Volcaniques intermédiaires gris verdâtre; grain moyen équi-granulaire; un peu de magnétite.
T-403	73 73 02	216 53 18	0.03	420	Skarn calco-silicate/oxides traversé par des injections felsiques.
T-404	73 23 72	216 95 05	0	132	Pourpre, porphyriques, à feldspath et pyroxène; carbonaté.
T-405	73 35 03	217 05 16	0.04	310	Brun; grain moyen à grossier; porphyres de feldspath plus abondant que pyroxène.
T-406	73 15 70	216 98 96	0.03	310	Brun; grain moyen; légèrement altérée; recoupé par des veines de quartz.
T-407	72 60 63	217 08 47	0.04	110	Gris; grain fin à moyen.
T-408	72 54 12	217 10 80	0.02	110	Gris; grain moyen, équi-granulaire; porphyres de quartz et de pyroxène.
T-409	72 55 62	217 19 16	0	110	Lessivé; grain moyen, équi-granulaire.
T-410	72 31 83	217 19 64	0	110	Gris; grain fin à moyen.
T-411	72 77 10	217 45 90	0	132	Grain moyen; porphyres de pyroxène et feldspath; un peu de quartz et amphibole.
T-412	72 82 74	217 46 00	0.05	112	Gris noir; grain fin à moyen : altéré (limonite); magnétique.
T-413	72 87 71	217 43 44	0.04	110	Grisâtre; grain fin à moyen, équi-granulaire; localement lessivé.
T-414	72 87 54	217 39 87	0.03	120	Grain moyen à grossier; porphyres de feldspath et quartz; magnétique.
T-415	72 78 58	217 40 81	0.02	122	Grain fin; abondance de porphyres de feldspath.
T-416	72 52 15	217 48 59	0.04	120	Grain moyen à grossier; porphyres de feldspath et quartz; magnétique.

**Note :** La série d'échantillons **T** est le levé géochimique régional de roches. La série d'échantillons **HAI-R** est le levé d'indices minéralisés régional. La valeur accordée aux résultats d'analyse sous la limite de détection est 0. La valeur absente se note par **N/A**. Échantillonnage et validation des données réalisés par Valentino Nelson et J. W. Colas pour les comptes de SODEMINE (2018).

SODEMINE, S.A.					RAPPORT
Échantillonnage de roches de la région de Terre Neuve					N°:C-2018 18 / 49
No. (Échantillon)	UTM Est	UTM Nord	Au (ppm)	Indice altération	DESCRIPTION
T-417	72 47 71	217 48 75	0.02	420	Skarn à grain moyen; localement de 15 à 20% de malachite.
T-418	72 37 41	217 47 46	0.03	112	Grain moyen équigranulaire; magnétique.
T-419	72 44 55	217 57 15	0.03	112	Grain moyen équigranulaire; magnétique.
T-420	72 31 92	217 64 55	0.03	112	Grain moyen équigranulaire; magnétique.
T-421	72 26 37	217 67 35	0	140	Vert, parfois brunâtre; matrice fine avec porphyres à grain moyen.
T-422	72 21 37	217 68 47	0	410	Skarn calco-silicate à quartz, calcite, hématite, magnétite et épidote.
T-423	72 39 86	217 65 10	0	320	Grain fin.
T-424	72 94 06	217 42 26	0	142	Grain moyen; à porphyres de pyroxène et feldspath; un peu de quartz.
T-425	72 96 10	217 48 42	0.02	120	Gris; à matrice et porphyres de feldspath et quartz.
T-426	72 77 85	217 39 52	0.04	410	Skarn calco-silicate à quartz, calcite, hématite, magnétite et épidote.
T-427	72 92 67	217 36 53	0	120	Gris; à matrice et porphyres de feldspath et quartz.
T-428	72 92 95	217 33 86	0	430	Skarn calco-silicaté à grain moyen, à grenat, chalcopryrite, malachite et azurite.
T-429	72 96 32	217 33 67	0.02	132	Grain moyen; porphyres de pyroxène et feldsaph, un peu de quartz.
T-430	72 65 83	217 82 30	0.03	110	Gris; grain fin à moyen.

**Note :** La série d'échantillons **T** est le levé géochimique régional de roches. La série d'échantillons **HAI-R** est le levé d'indices minéralisés régional. La valeur accordée aux résultats d'analyse sous la limite de détection est 0. La valeur absente se note par **N / A**. Échantillonnage et validation des données réalisés par Valentino Nelson et J. W. Colas pour les comptes de SODEMINE (2018).

SODEMINE, S.A.					RAPPORT
Échantillonnage de roches de la région de Terre Neuve					N°:C-2018 19 / 49
No. (Échantillon)	UTM Est	UTM Nord	Au (ppm)	Indice altération	DESCRIPTION
T-431	72 74 92	217 82 63	0.02	122	Localement, porphyres de feldspath et un peu de quartz; hématite et malachite.
T-432	72 77 76	217 83 32	0	122	Localement, porphyres de feldspath et un peu de quartz; hématite et malachite.
T-433	72 82 59	217 81 96	0	100	Grain fin; roche mafique (diabase?); magnétique.
T-434	72 88 71	217 83 23	0.04	120	Verdâtre; grain fin à moyen; porphyres dispersés de feldspath.
T-435	72 91 46	217 82 31	0.02	130	Matrice à grain fin; porphyres de feldspath et pyroxène.
T-436	72 94 92	217 82 83	0.02	120	Verdâtre; grain fin à moyen; porphyres dispersés de feldspath.
T-437	72 61 90	217 89 78	0.03	110	Verdâtre; grain fin à moyen; vésiculaire; porphyres dispersés de feldspath.
T-438	72 55 75	217 93 98	0.02	132	Matrice verdâtre à grain fin; porphyres de feldspath, pyroxène, un peu de quartz.
T-439	72 55 44	217 97 53	0.03	122	Grain moyen, équi-granulaire; légèrement altéré; porphyres de feldspath.
T-440	72 65 95	217 86 35	0.02	320	Grain moyen, équi-granulaire; pyroxène altéré.
T-441	71 69 50	217 82 00	0.02	110	Grain fin, équi-granulaire, porphyres de feldspath, un peu de quartz; recoupé par des veinules de quartz; magnétique.
T-442	71 67 06	217 88 24	0.04	120	Roche silicifiée; porphyres de feldspath et cristaux aciculaire d'amphibole.
T-443	71 65 08	217 87 37	0.03	100	Porphyres de feldspath particulièrement grossier.
T-444	71 61 68	217 87 67	0.03	120	Roche silicifiée; grain moyen à grossier; porphyres de feldspath et quartz; 10 à 15% malachite.

**Note :** La série d'échantillons **T** est le levé géochimique régional de roches. La série d'échantillons **HAI-R** est le levé d'indices minéralisés régional. La valeur accordée aux résultats d'analyse sous la limite de détection est 0. La valeur absente se note par **N/A**. Échantillonnage et validation des données réalisés par Valentino Nelson et J. W. Colas pour les comptes de SODEMINE (2018).

SODEMINE, S.A.					RAPPORT
Échantillonnage de roches de la région de Terre Neuve					N°:C-2018 20 / 49
No. (Échantillon)	UTM Est	UTM Nord	Au (ppm)	Indice altération	DESCRIPTION
T-445	71 56 98	217 90 72	0.04	100	Grain fin, équigranulaire, porphyres de feldspath, un peu de quartz; recoupé par des veinules de quartz; magnétique.
T-446	71 56 93	217 87 77	0.03	120	Roche silicifiée; porphyres de feldspath et cristaux aciculaire d'amphibole.
T-447	71 62 25	217 82 76	0	120	Porphyres de feldspath particulièrement grossier.
T-448	71 83 32	217 74 95	0.04	120	Roche silicifiée; grain moyen à grossier; porphyres de feldspath et quartz; 10 à 15% malachite.
T-449	71 83 04	217 79 61	0.04	122	Grain fin, équigranulaire, porphyres de feldspath, un peu de quartz; recoupé par des veinules de quartz; magnétique.
T-450	71 82 83	217 80 54	0.04	130	Roche silicifiée; porphyres de feldspath et cristaux aciculaire d'amphibole.
T-451	71 81 48	217 85 48	0.02	122	Porphyres de feldspath particulièrement grossier.
T-452	71 86 72	217 81 84	0.04	122	Roche silicifiée; grain moyen à grossier; porphyres de feldspath et quartz; 10 à 15% malachite.
T-453	71 88 96	217 78 70	0.04	100	Grain fin, équigranulaire; lambeaux de sédiments.
T-454	71 95 35	217 72 01	0.04	120	Grain fin à moyen; porphyres de feldspath et quartz.
T-455	71 99 41	217 73 83	0.02	160	Roche silicifiée, non-granoclassée.
T-456	71 89 46	217 72 57	0.02	130	Gris-vert; matrice à grain fin; porphyres de pyroxène et de feldspath.
T-457	72 21 07	217 79 86	0.02	140	Brunâtre; grain moyen à grossier; magnétique.

**Note :** La série d'échantillons **T** est le levé géochimique régional de roches. La série d'échantillons **HAI-R** est le levé d'indices minéralisés régional. La valeur accordée aux résultats d'analyse sous la limite de détection est 0. La valeur absente se note par **N/A**. Échantillonnage et validation des données réalisés par Valentino Nelson et J. W. Colas pour les comptes de SODEMINE (2018).

SODEMINE, S.A.					RAPPORT
Échantillonnage de roches de la région de Terre Neuve					N°:C-2018 21 / 49
No. (Échantillon)	UTM Est	UTM Nord	Au (ppm)	Indice altération	DESCRIPTION
T-458	72 15 05	217 92 71	0.04	140	Brunâtre; grain moyen à grossier; magnétique.
T-459	72 13 38	217 96 99	0.02	100	Brunâtre; grain fin; silicifié et recoupé par des veinules de quartz.
T-460	73 02 21	217 38 21	0	142	Roche à grain fin; porphyres de pyroxène et feldspath.
T-461	73 06 25	217 41 68	0.03	120	Brun; grain fin équigranulaire.
T-462	73 05 72	217 47 37	0.02	130	Grain fin à grossier; porphyres de pyroxène et feldspath (chlorite).
T-463	73 03 72	217 54 46	0.02	110	Grain fin, vésiculaire; calcite dans les fractures.
T-464	72 98 28	217 73 47	0	100	Volvanoclastite; grain moyen; porphyres de feldspath.
T-465	72 94 23	217 71 50	0.02	120	Grain fin à moyen; porphyres de feldspath; limonite.
T-466	72 90 89	217 70 31	0	120	Grain fin à moyen; localement vésiculaire; porphyres de feldspath.
T-467	72 85 77	217 70 62	0	410	Skarn calco-silicaté à épidote, diopside et magnétite.
T-468	72 80 51	217 67 37	0	100	Grain moyen, équigranulaire; carbonates.
T-469	72 27 93	218 19 41	0	120	Grain fin; vésiculaire; porphyres de feldspath; malachite dans fractures.
T-470	72 23 29	218 18 35	0.02	140	Matrice à grain fin; très magnétique.
T-471	72 17 60	218 19 46	0	100	Roche à fragments anguleux à sub-arrondis dans un porphyre à grain moyen.
T-472	72 12 84	218 21 14	0.02	100	Roche à fragments anguleux à sub-arrondis dans un porphyre à grain moyen.

**Note :** La série d'échantillons **T** est le levé géochimique régional de roches. La série d'échantillons **HAI-R** est le levé d'indices minéralisés régional. La valeur accordée aux résultats d'analyse sous la limite de détection est 0. La valeur absente se note par **N/A**. Échantillonnage et validation des données réalisés par Valentino Nelson et J. W. Colas pour les comptes de SODEMINE (2018).

SODEMINE, S.A.					RAPPORT
Échantillonnage de roches de la région de Terre Neuve					N°:C-2018 22 / 49
No. (Échantillon)	UTM Est	UTM Nord	Au (ppm)	Indice altération	DESCRIPTION
T-473	72 09 17	218 20 37	0.2	120	Gris; grain fin à moyen; porphyres de feldspath; magnétique; malachite.
T-474	72 04 22	218 18 22	0.2	130	Grain moyen; porphyres de feldspath et pyroxène.
T-475	72 01 57	218 17 75	0.03	120	Grain fin à moyen; vésiculaire; malachite disséminée.
T-476	71 96 52	218 16 77	0.05	110	Grain fin; zone de contact (métamorphisme de contact).
T-477	71 96 39	218 12 37	0.02	102	Gris blanchâtre; grain fin; amphibole; limonite dans fractures; magnétique.
T-478	72 00 49	218 12 43	0	120	Grain fin équigranulaire; malachite dans fractures; magnétique.
T-479	72 04 34	218 15 85	0	120	Grain fin équigranulaire; porphyres dispersés de feldspath.
T-480	72 10 56	218 17 85	0.02	120	Grisâtre; grain fin; porphyres de feldspath; vésiculaire; limonite.
T-481	72 15 11	218 17 65	0	100	Volcanoclastite; matrice verdâtre à grain fin.
T-482	72 17 80	218 16 23	0	120	Grain moyen; porphyres de feldspath; altération dans les fractures.
T-483	72 26 40	218 23 47	0	120	Grain fin; vésiculaire; porphyres de feldspath grossier; calcite dans les fractures.
T-484	72 22 46	218 20 84	0	420	Skarn calco-silicaté à quartz, calcite, épidote, magnétite et malachite.
T-485	72 29 56	218 17 43	0.02	120	Grain fin à moyen; porphyres de feldspath; limonite et malachite.
T-486	72 29 58	218 13 52	0	130	Grain fin à grossier; limonite dans les fractures; magnétique.
T-487	72 32 39	218 12 73	0.02	140	Grain fin équigranulaire; limonite dans les fractures; magnétique.

**Note :** La série d'échantillons **T** est le levé géochimique régional de roches. La série d'échantillons **HAI-R** est le levé d'indices minéralisés régional. La valeur accordée aux résultats d'analyse sous la limite de détection est 0. La valeur absente se note par **N / A**. Échantillonnage et validation des données réalisés par Valentino Nelson et J. W. Colas pour les comptes de SODEMINE (2018).

SODEMINE, S.A.					RAPPORT
Échantillonnage de roches de la région de Terre Neuve					N°:C-2018 23 / 49
No. (Échantillon)	UTM Est	UTM Nord	Au (ppm)	Indice altération	DESCRIPTION
T-488	72 34 41	218 16 44	0	120	Grain fin; porphyres de feldspath; calcite dans fractures; malachite disséminée.
T-489	72 31 33	217 75 02	0.03	120	Grain fin; vésiculaire; hématisé.
T-490	72 31 41	217 78 67	0.06	300	Gabbro
T-491	72 27 93	217 75 43	0.06	140	Grain fin équigranulaire; limonite dans les fractures; magnétique.
T-492	72 24 42	217 76 25	0.02	120	Gris-vert; grain fin; porphyres de feldspath; magnétique.
T-493	72 27 52	217 78 52	0.02	140	Brun-vert; grain fin; porphyres de pyroxène.
T-494	73 35 05	217 02 84	0	300	Intrusif felsique à grain fin; texture brêchique; Bresiac tunnel #5.
T-495	72 34 35	217 81 00	0	122	Gris; grain fin équigranulaire; limonite.
T-496	72 43 22	217 76 48	0.02	300	Gabbro.
T-497	72 43 03	217 78 23	0	300	Gabbro.
T-498	72 47 37	217 75 60	0	300	Gabbro; lessivé; limonite.
T-499	72 50 24	217 76 56	0.03	300	Gabbro; altéré.
T-500	72 62 02	217 71 32	0	300	Gabbro; altéré.
T-501	72 67 05	217 70 48	0	300	Gabbro; altéré.
T-502	72 62 63	217 68 14	0.02	122	Brun; grain fin; porphyres de feldspath.

**Note :** La série d'échantillons **T** est le levé géochimique régional de roches. La série d'échantillons **HAI-R** est le levé d'indices minéralisés régional. La valeur accordée aux résultats d'analyse sous la limite de détection est 0. La valeur absente se note par **N / A**. Échantillonnage et validation des données réalisés par Valentino Nelson et J. W. Colas pour les comptes de SODEMINE (2018).

SODEMINE, S.A.					RAPPORT
Échantillonnage de roches de la région de Terre Neuve					N°:C-2018 24 / 49
No. (Échantillon)	UTM Est	UTM Nord	Au (ppm)	Indice altération	DESCRIPTION
T-503	72 44 16	218 09 15	0.02	120	Gris; grain fin; porphyres de feldspath particulièrement grossier.
T-504	72 40 01	218 11 25	0.03	110	Gris, plus ou moins brunâtre; aphanitique; limonite par endroits.
T-505	72 37 84	218 14 35	0.03	120	Vert-brunâtre; grain moyen; porphyres dispersés de feldspath.
T-506	72 36 39	218 11 69	0.02	120	Vert-braunâtre; grain-moyen; porphyres dispersés de feldspath; zonations locales de malachite.
T-507	72 15 18	218 13 30	0.03	310	Gris-brun; grain moyen; porphyres de quartz plus abondants que feldspath.
T-508	72 09 44	218 12 40	0.02	140	Gris-pourpre; matrice à grain fin; porphyres de pyroxène et amphibole; altération locale.
T-509	72 05 56	218 13 12	0.02	120	Gris-brun; grain fin équigranulaire; porphyres de feldspath.
T-510	72 01 34	218 06 71	0	120	Gris-pourpre; grain fin; vésiculaire; porphyres dispersés de feldspath.
T-511	72 00 56	218 02 78	0	120	Gris-pourpre; grain fin; vésiculaire; porphyres dispersés de feldspath; limonite en surface.
T-512	72 04 39	217 99 06	0	120	Gris-pourpre; grain fin; vésiculaire; porphyres dispersés de feldspath; limonite en surface.
T-513	72 10 06	217 94 89	0	120	Gris-pourpre; grain fin; vésiculaire; porphyres dispersés de feldspath; limonite en surface.
T-514	71 99 08	218 00 04	0.02	120	Brun; grain fin; vésiculaire; porphyres isolés de feldspath.
T-515	71 95 79	218 04 05	0.03	120	Brun; grain fin; vésiculaire; porphyres isolés de feldspath.

**Note :** La série d'échantillons **T** est le levé géochimique régional de roches. La série d'échantillons **HAI-R** est le levé d'indices minéralisés régional. La valeur accordée aux résultats d'analyse sous la limite de détection est 0. La valeur absente se note par **N/A**. Échantillonnage et validation des données réalisés par Valentino Nelson et J. W. Colas pour les comptes de SODEMINE (2018).

SODEMINE, S.A.					RAPPORT
Échantillonnage de roches de la région de Terre Neuve					N°:C-2018 25 / 49
No. (Échantillon)	UTM Est	UTM Nord	Au (ppm)	Indice altération	DESCRIPTION
T-516	71 92 79	218 10 43	0.03	110	Gris-brun; aphanitique; limonite locale
T-517	74 20 81	216 26 18	0	120	Grain fin à moyen; vésiculaire; localement, limonite et malachite dans fractures; magnétique.
T-518	74 25 13	216 21 26	0	320	Porphyres de quartz, avec un peu de feldspath; malachite dans fractures.
T-519	74 25 00	216 16 37	0	320	Malachite et magnétite (?).
T-520	74 28 87	216 21 50	0	120	Gris; grain fin; équigranulaire; roches silicifiée.
T-521	74 27 42	216 25 89	0.02	320	Gris-vert à pourpre; malachite disséminée.
T-522	74 16 46	216 28 63	0.03	120	Brun; grain moyen à grossier; vésiculaire; taches isolées de malachite.
T-523	74 12 46	216 29 19	0	122	Grain grossier; porphyres de feldspath dominants.
T-524	74 11 51	216 34 22	0.04	122	Gris-pourpre; grain moyen à grossier; porphyres de feldspath, un peu de quartz.
T-525	74 10 33	216 38 91	0.04	120	Brun; grain fin à moyen; porphyres de feldspath, un peu de quartz.
T-526	74 09 27	216 43 06	0.03	120	Brun; grain fin à moyen; porphyres de feldspath, un peu de quartz.
T-527	74 08 61	216 48 45	0.03	120	Grain fin équigranulaire; vésiculaire; porphyres de feldspath.
T-528	74 06 50	216 52 78	0.02	120	Brun-verdâtre; matrice fine; porphyres de feldspath particulièrement grossier.
T-529	74 03 69	216 47 11	0	120	Brun-verdâtre; matrice fine; porphyres de feldspath particulièrement grossier.
T-530	74 05 12	216 42 46	0.02	120	Brun; grain fin à moyen; porphyres de feldspath.

**Note :** La série d'échantillons **T** est le levé géochimique régional de roches. La série d'échantillons **HAI-R** est le levé d'indices minéralisés régional. La valeur accordée aux résultats d'analyse sous la limite de détection est 0. La valeur absente se note par **N/A**. Échantillonnage et validation des données réalisés par Valentino Nelson et J. W. Colas pour les comptes de SODEMINE (2018).

SODEMINE, S.A.					RAPPORT
Échantillonnage de roches de la région de Terre Neuve					N°:C-2018 26 / 49
No. (Échantillon)	UTM Est	UTM Nord	Au (ppm)	Indice altération	DESCRIPTION
T-531	74 05 97	216 34 20	0.02	120	Brun; grain fin équi-granulaire; porphyres dispersés de feldspath.
T-532	74 04 12	216 30 33	0.02	130	Gris-brun; grain moyen; porphyres de feldspath plus abondants que pyroxène.
T-533	74 04 50	216 26 61	0.03	130	Gris-brun; grain moyen; porphyres de feldspath plus abondants que pyroxène.
T-534	74 01 35	216 29 94	0.02	132	Gris-pourpre; grain moyen à grossier; porphyres de feldspath plus abondants que pyroxène; magnétique.
T-535	74 01 12	216 26 35	0.02	110	Roche silicifiée à fragments; recoupé par des veinules de quartz.
T-536	74 00 91	216 22 45	0	130	Pourpre; grain moyen; porphyres de feldspath plus abondants et grossiers que les porphyres de pyroxène.
T-537	74 02 64	216 12 13	0.02	310	Jaunâtre; grain moyen à grossier; porphyres de feldspath plus abondants que pyroxène.
T-538	74 01 36	216 07 05	0.03	310	Grisâtre; grain moyen à grossier; porphyres de feldspath plus abondants que pyroxène.
T-539	74 08 86	216 17 94	0.03	310	Jaunâtre; grain moyen à grossier; porphyres de feldspath plus abondants que pyroxène.
T-540	74 12 10	216 20 63	0.03	130	Pourpre vif; grain moyen; porphyres de feldspath plus abondants que pyroxène
T-541	74 11 05	216 26 28	0.02	310	Jaunâtre; grain moyen à grossier; porphyres de feldspath plus abondants que pyroxène.
T-542	74 18 58	216 00 71	0.03	310	Brun; grain moyen; porphyres de feldspath plus abondants que pyroxène et amphibole.

**Note :** La série d'échantillons T est le levé géochimique régional de roches. La série d'échantillons HAI-R est le levé d'indices minéralisés régional. La valeur accordée aux résultats d'analyse sous la limite de détection est 0. La valeur absente se note par N/A. Échantillonnage et validation des données réalisés par Valentino Nelson et J. W. Colas pour les comptes de SODEMINE (2018).

SODEMINE, S.A.					RAPPORT
Échantillonnage de roches de la région de Terre Neuve					N°:C-2018 27 / 49
No. (Échantillon)	UTM Est	UTM Nord	Au (ppm)	Indice altération	DESCRIPTION
T-543	74 17 75	216 05 36	0.03	200	Grain moyen équigranulaire; contient des fragments d'intrusif particulièrement grossier.
T-600	74 24 14	216 87 67	0.03	120	Gris-vert; grain moyen; porphyres de feldspath.
T-601	74 24 01	216 80 87	0.03	110	Vert; grain fin équigranulaire; malachite disséminée.
T-602	74 28 01	216 82 35	0.05	160	Chert limonitisé; abondantes veinules de quartz blanc.
T-603	74 27 56	216 78 70	0.02	110	Gris-brun; grain moyen.
T-604	74 23 35	216 75 99	0.04	110	Gris-brun; gris noirâtre; clivage bien développé.
T-605	74 28 03	216 71 91	0.04	110	Vert lessivé; grain fin à moyen, équigranulaire.
T-606	74 20 99	216 72 44	0.04	310	Grain moyen; porphyres de feldspath plus abondants que quartz; limonite.
T-607	74 17 90	216 68 28	0.03	110	Gris-brun; gris noirâtre; clivage bien développé.
T-608	74 23 05	216 61 04	0.03	110	Gris-brun; gris noirâtre; clivage bien développé.
T-609	74 27 58	216 62 33	0.02	320	Porphyre à quartz, avec un peu de feldspath; malachite disséminée.
T-610	74 25 90	216 69 72	0.04	320	Porphyre à quartz, avec un peu de feldspath; roche altérée; malachite disséminée.
T-611	74 28 91	216 66 69	0.03	320	Porphyre à quartz et feldspath; malachite disséminée.
T-612	74 33 46	216 68 85	0.03	310	Gris-vert; grain moyen équigranulaire; porphyres de feldspath plus abondants que pyroxène et amphibole.

**Note :** La série d'échantillons **T** est le levé géochimique régional de roches. La série d'échantillons **HAI-R** est le levé d'indices minéralisés régional. La valeur accordée aux résultats d'analyse sous la limite de détection est 0. La valeur absente se note par **N/A**. Échantillonnage et validation des données réalisés par Valentino Nelson et J. W. Colas pour les comptes de SODEMINE (2018).

SODEMINE, S.A.					RAPPORT
Échantillonnage de roches de la région de Terre Neuve					N°:C-2018 28 / 49
No. (Échantillon)	UTM Est	UTM Nord	Au (ppm)	Indice altération	DESCRIPTION
T-613	74 34 35	216 63 07	0.02	320	Porphyre à quartz, avec un peu de feldspath; pyrite et malachite disséminées.
T-614	74 26 99	216 59 03	0.04	320	Porphyres de quartz plus abondants que feldspath.
T-615	74 22 17	216 59 94	0.04	320	Porphyres de quartz plus abondants que feldspath; roche rouillée; 1% pyrite.
T-616	74 35 57	216 55 62	0.04	100	Volcanoclastite ou roche à fragments silicifiés; recoupé par des veinules de quartz.
T-617	74 36 74	216 52 18	0.04	310	Gris-vert; grain moyen équi-granulaire; porphyres de feldspath plus abondants que pyroxène et amphibole; faiblement magnétique.
T-618	74 36 62	216 47 34	0.03	310	Gris-vert; grain moyen équi-granulaire; porphyres de feldspath plus abondants que pyroxène et amphibole aciculaire (de 7 à 10%).
T-619	74 39 54	216 43 73	0.02	310	Gris-vert; grain moyen équi-granulaire; porphyres de feldspath plus abondants que pyroxène et amphibole.
T-620	74 42 41	216 38 92	0.02	310	Gris-vert; grain moyen équi-granulaire; porphyres de feldspath plus abondants que pyroxène et amphibole.
T-621	74 36 84	216 35 25	0.04	310	Gris-vert; grain moyen équi-granulaire; porphyres de feldspath plus abondants que pyroxène et amphibole.
T-622	74 40 00	216 35 04	0.04	310	Gris-vert; grain moyen équi-granulaire; porphyres de feldspath plus abondants que pyroxène et amphibole aciculaire (de 7 à 10%).
T-623	74 32 80	216 38 42	0.02	320	Porphyre à quartz, avec un peu de feldspath; pyrite et malachite disséminées.

**Note :** La série d'échantillons **T** est le levé géochimique régional de roches. La série d'échantillons **HAI-R** est le levé d'indices minéralisés régional. La valeur accordée aux résultats d'analyse sous la limite de détection est 0. La valeur absente se note par **N/A**. Échantillonnage et validation des données réalisés par Valentino Nelson et J. W. Colas pour les comptes de SODEMINE (2018).

SODEMINE, S.A.					RAPPORT
Échantillonnage de roches de la région de Terre Neuve					N°:C-2018 29 / 49
No. (Échantillon)	UTM Est	UTM Nord	Au (ppm)	Indice altération	DESCRIPTION
HAI-R 1	73 34 36	216 84 56	-1 8.62%	330	Barrière Lanmac; Injection felsique lenticulaire recoupant andésite porphyrique; apparemment <10m. de long et qq. Mètres de large; intrusive contenant des traces à 15-20% de malachite et +/- d'azurite; pas de sulfures visibles; radioact : bruit de fond.
HAI-R 2	73 34 24	216 81 62	-1	330	Rocher 2; Petites injections felsiques recoupant de l'andésite (contacts nets), légèrement tachetées de malachite par endroits; radioactivité égale au bruit de fond 30-40 cps.
HAI-R 3	73 34 24	216 81 62	-1	120	Rocher 2; Andésite prélevée près du contact avec les petites injections felsiques de l'échantillon HAI-R-002; légèrement tachetée de malachite par endroits.
HAI-R 4	73 33 84	216 78 74	-1	310	Rocher 2; Intrusion felsique (syénite ou diorite) dans andésite; roche altérée en surface; légèrement tachetée de malachite par endroits; petit puit d'exploration; radioactivité : 60-80 cps (bruit de fond : 40 cps dans andésite adjacente); contact 300°.
HAI-R 5	73 35 49	216 77 52	-1	330	Rocher 2; Intrusion felsique (syénite) légèrement tachetée de malachite par endroits; petit adit 3m. de profond à cet endroit; radioactivité : 45 cps (bruit de fond); affleurement de calcaire à 7-8 m. au sud de l'échantillon.
HAI-R 6	73 36 03	216 77 95	-1	400	Rocher 2; Petite zone deskarn isolée dans calcaire (métasomatisme); dimension observable : quelques mètres de long et quelques décimètres de large; quelques taches dispersées de malachite; radioactivité : 35 cps.

**Note :** La série d'échantillons **T** est le levé géochimique régional de roches. La série d'échantillons **HAI-R** est le levé d'indices minéralisés régional. La valeur accordée aux résultats d'analyse sous la limite de détection est 0. La valeur absente se note par **N / A**. Échantillonnage et validation des données réalisés par Valentino Nelson et J. W. Colas pour les comptes de SODEMINE (2018).

SODEMINE, S.A.					RAPPORT
Échantillonnage de roches de la région de Terre Neuve					N°:C-2018 30 / 49
No. (Échantillon)	UTM Est	UTM Nord	Au (ppm)	Indice altération	DESCRIPTION
HAI-R 7	73 38 51	216 77 93	-1 6.83%	120	Rocher 2; Andésite altérée en surface et carbonatée; contient ici et là de petites zones tachetées de malachite (de traces à 5%); roche contenant plus de malachite est plus hématisée; ancienne tranchée remplie à cet endroit; radioactivité : 35 cps.
HAI-R 8	73 52 50	216 66 15	-1	300	Sentier au nord de Foucard; Injection felsique, 2-3 m. de largeur, recoupant andésite porphyrique; roche bien altérée en surface avec limonite et un peu de jarosite; radioactivité : bruit de fond (30 cps) pour injection felsique et andésite.
HAI-R 9	73 49 81	216 65 03	-1 4.11%	500	Foucard; Échantillon choisi du principal affleurement minéralisé; horizon de chert (dans séquence interlitée chert-calcaire), environ 10 cm. d'épais, +/- bréchifié; un peu de chalcosine dans fractures et cavités; roche tachetée de malachite et +/- azurite.
HAI-R 10	73 49 81	216 65 03	-1 9.76%	500	Foucard; Petite zone de cisaillement (de 5 à 20 cm de largeur) recoupant la séquence de chert-calcaire minéralisée; minéralisation entièrement constituée de malachite avec azurite en quantité moindre.
HAI-R 11	73 52 38	216 66 59	-1	120	Sentier au nord de Foucard; Andésite porphyrique bien hématisée à proximité d'un contact avec roche intrusive (?) vert pâle; roche bien altérée en surface; pas de minéralisation visible.
HAI-R 12	73 52 38	216 66 59	-1	300	Sentier au nord de Foucard; Échantillon prélevé au même site que HAI-R-011; roche intrusive (?) vert pâle, équigrulaire et grain relativement fin, prélevée près du contact avec andésite porphyrique hématisée; roche légèrement radioactive (60 cps)

**Note :** La série d'échantillons **T** est le levé géochimique régional de roches. La série d'échantillons **HAI-R** est le levé d'indices minéralisés régional. La valeur accordée aux résultats d'analyse sous la limite de détection est 0. La valeur absente se note par **N / A**. Échantillonnage et validation des données réalisés par Valentino Nelson et J. W. Colas pour les comptes de SODEMINE (2018).

SODEMINE, S.A.					RAPPORT
Échantillonnage de roches de la région de Terre Neuve					N°:C-2018 31 / 49
No. (Échantillon)	UTM Est	UTM Nord	Au (ppm)	Indice altération	DESCRIPTION
HAI-R 13	73 39 50	216 82 51	-1 9.10%	330	Casséné; Injection lenticulaire de porphyre bréchifié dans de l'andésite porphyrique; les débris de pente suggère que la lentille minéralisée est d'au plus 7-8 m. de long; contient jusqu'à 5-8% de malachite; radioactivité : 30-35 cps (bruit de fond).
HAI-R 14	73 39 50	216 82 51	-1 11.11%	330	Casséné; Similaire à HAI-R-013, mais provenant d'une petite zone localement hématisée.
HAI-R 15	73 38 33	216 81 28	-1 10.82%	300	Casséné; Groupe de petites veines felsiques recoupant andésite porphyrique; contient traces occasionnelles de malachite; l'échantillon provient d'une petite zone de fractures avec malachite reconcentrée (azurite et chalcocine mineures); radioact : 30 cps.
HAI-R 16	73 35 18	216 80 57	-1 5.23%	120	Rocher 2; Groupe d'affleurements d'andésite +/- porphyrique, grise à pourpre; contient, ici et là, des traces de malachite en placage le long des fractures; l'échantillon provient de roche plus minéralisée contenant 1-2% malachite; radioactivité : 30 cps.
HAI-R 17	73 56 23	216 68 65	-1 10.08%	420	Casséus zone SO; Skarn calco-silicaté riche en grenat; au site de prélèvement, la roche contient jusqu'à 10-20% d'oxides de fer; un peu de chalcopryrite visible atteignant par endroits 1-2%; aucune variation de radioactivité par rapport au bruit de fond.
HAI-R 18	73 27 60	216 98 98	-1	300	Sentier SO de Bresiac; Intrusif felsique, grain fin, équigranulaire; échantillonnage d'une zone traversée par quelques veines de quartz (carbonates mineurs); pyrite très finement disséminée, parfois en minces placage; radioact : 50-55 cps (bruit de fond).

**Note :** La série d'échantillons **T** est le levé géochimique régional de roches. La série d'échantillons **HAI-R** est le levé d'indices minéralisés régional. La valeur accordée aux résultats d'analyse sous la limite de détection est 0. La valeur absente se note par **N/A**. Échantillonnage et validation des données réalisés par Valentino Nelson et J. W. Colas pour les comptes de SODEMINE (2018).

SODEMINE, S.A.					RAPPORT
Échantillonnage de roches de la région de Terre Neuve					N°:C-2018 32 / 49
No. (Échantillon)	UTM Est	UTM Nord	Au (ppm)	Indice altération	DESCRIPTION
HAI-R 19	73 27 60	216 98 98	-1	300	Sentier SO de Bresiac; Roche et minéralisation similaires à HAI-R-018 (prélevé à 6-7 m. plus au nord) mais d'apparence plus intermédiaire; ces roches, ont des caractères qui rappellent l'andésite, peuvent possiblement être le produit d'une altération.
HAI-R 20	73 27 60	216 99 18	-1	120	Sentier SO de Bresiac; Échant. prélevé à 20 m. nord de HAI-R-019; contient dissémination très fine de pyrite; surface altérée, roche similaire à l'andésite porphyrique à feldspath; surface fraîche, la matrice semble relativement felsique (similaire à Estime).
HAI-R 21	73 32 06	217 01 58	-1 16,03%	440	Bresiac; Échantillon bien choisi provenant d'une zone lenticulaire de forme irrégulière (veine) à texture grossière, encaissée dans du skarn riche en grenat; localement, certaines concentrations de Cpy peuvent atteindre >10%; jusqu'à 5-10% oxides Fe.
HAI-R 1043	72 93 68	217 70 12	0	-1	Horizon chertoux fragmenté, recoupé par des carbonates.
HAI-R 1044	72 26 88	218 19 05	0	120	Gris-vert; grain fin; porphyres de feldspath; placage de malachite dans les fractures; limonitisation partielle.
HAI-R 1045	72 58 55	217 91 84	0.02	120	Gris-vert; grain fin; porphyres de feldspath; 3-5% malachite disséminée.
HAI-R 1046	-1	-1	0.03	320	Porphyres recoupant volcaniques; carbonisation.
HAI-R 1047	72 28 91	217 75 57	0.07	320	Porphyres recoupant volcaniques; carbonisation, recoupé par des veinules de chalcosine, avec un peu de bornite.

**Note :** La série d'échantillons **T** est le levé géochimique régional de roches. La série d'échantillons **HAI-R** est le levé d'indices minéralisés régional. La valeur accordée aux résultats d'analyse sous la limite de détection est 0. La valeur absente se note par **N / A**. Échantillonnage et validation des données réalisés par Valentino Nelson et J. W. Colas pour les comptes de SODEMINE (2018).

SODEMINE, S.A.					RAPPORT
Échantillonnage de roches de la région de Terre Neuve					N°:C-2018 33 / 49
No. (Échantillon)	UTM Est	UTM Nord	Au (ppm)	Indice altération	DESCRIPTION
HAI-R 1048	72 26 37	217 78 03	1.13	320	Dyke recoupant roche volcanique vésiculaire à porphyres de pyroxène; de 25 à 30% chalcosine et malachite; direction : 315°; largeur : 2 m.
HAI-R 28	72 99 68	217 04 08	-1	120	Boisneuf; Échantillon d'andésite porphyrique pourpre, pris à environ 2 m. d'une faille juxtaposant une zone d'altération intense; la roche varie de peu à modérément fracturée et contient des traces de Py très finement disséminée; radioact : 65-70 cps.
HAI-R 29	72 99 71	217 04 11	-1	124	Boisneuf; Andésite très intensément altérée, adjacente à une faille juxtaposant la zone altérée à l'andésite peu altérée; la roche a l'apparence d'une intrusion felsique; contient 2-4% Py très finement disséminée (traces de Cpy); radioact : 90-95 cps.
HAI-R 30	72 99 78	217 04 18	-1	122	Boisneuf; Zone où l'altération commence à envahir l'andésite le long des plans de fractures; les marges altérées contiennent jusqu'à quelques % de Py très finement disséminée et en minces filonnets.
HAI-R 31	73 00 08	217 04 48	-1	124	Boisneuf; Roche très intensément altérée (andésite) qui prend l'apparence d'une brèche de roche porphyrique felsique; quoique la roche soit bien poreuse et lessivée, elle peut contenir >5-10% Py très finement disséminée.
HAI-R 32	73 43 13	216 65 29	-1	500	Foucard Extension ouest; Affleurement de calcaire (Fm. Miguinda?); roche similaire à Foucard (prolongement stratigraphique); quelques taches de malachite et d'azurite (faible minéralisation); échantillon de la meilleure minéralisation.

**Note :** La série d'échantillons **T** est le levé géochimique régional de roches. La série d'échantillons **HAI-R** est le levé d'indices minéralisés régional. La valeur accordée aux résultats d'analyse sous la limite de détection est 0. La valeur absente se note par **N / A**. Échantillonnage et validation des données réalisés par Valentino Nelson et J. W. Colas pour les comptes de SODEMINE (2018).

SODEMINE, S.A.					RAPPORT
Échantillonnage de roches de la région de Terre Neuve					N°:C-2018 34 / 49
No. (Échantillon)	UTM Est	UTM Nord	Au (ppm)	Indice altération	DESCRIPTION
HAI-R 33	73 56 23	216 68 80	-1	420	Casséus zone SO; Similaire à HAI-R-017, prélevé à environ 15 m. plus au nord.
HAI-R 34	72 73 75	217 39 08	0.02	330	Secteur Ka Philippe : petite intrusion dans 120 relativement grossier; malachite dissém. et le long de fractures; chalcosine locale à qq. endroits dans fractures; échant. = représentatif de roche relativement bien minéralisée.
HAI-R 35	72 73 75	217 39 08	0.02	330	Secteur Ka Philippe : même affleurement que HAI-R-034; échantillon choisi bien minéralisé.
HAI-R 36	72 75 46	217 37 77	0	330	Ka Philippe : série de petites injections dans 120 pourpre relativement grossier; teinte rougeâtre hématisée; malachite, azurite mineure et un peu de chalcosine locale; minéralisation disséminée, toutefois plus concentrée le long et en marge de fractures.
HAI-R 37	72 77 48	217 39 20	0.06	330	Ka Philippe : similaire à HAI-R-036; andésite encaissante particulièrement grossière, à texture bréchique (fragments et matrice de même composition).
HAI-R 38	72 76 44	217 43 29	0.03	330	Ka Philippe : similaire à HAI-R-036; blocs sub-en-place au sommet d'une colline.
HAI-R 39	73 46 08	217 17 81	0	100	Secteur de Moulin : volcaniques vésiculaires; gris verdâtre lessivé; grain relativement fin équigranulaire; quelques petites zones (quelques mètres) légèrement tachetées de malachite.
HAI-R 40	72 99 54	217 25 37	0.02	330	Secteur Morne Polvo : petits blocs minéralisés (aire : 10 m x 5 m dans débris de pente); encaissant : 120; malachite, chalcosine (azurite occas.) de traces à >20-30%.

**Note :** La série d'échantillons **T** est le levé géochimique régional de roches. La série d'échantillons **HAI-R** est le levé d'indices minéralisés régional. La valeur accordée aux résultats d'analyse sous la limite de détection est 0. La valeur absente se note par **N / A**. Échantillonnage et validation des données réalisés par Valentino Nelson et J. W. Colas pour les comptes de SODEMINE (2018).

SODEMINE, S.A.						RAPPORT
Échantillonnage de roches de la région de Terre Neuve						N°:C-2018 35 / 49
No. (Échantillon)	UTM Est	UTM Nord	Au (ppm)	Indice altération	DESCRIPTION	
HAI-R 41	68 61 61	218 94 30	0	310	Jean Rabel (Vert de gris) : granodiorite à feldspath blanc, quartz et amphibole; traces finement disséminées de sulfures (Py, Cpy) à plusieurs endroits; roches fracturée et tacheté de malachite.	
HAI-R 42	68 61 61	218 94 30	0	310	Jean Rabel (Vert de gris) : granodiorite à feldspath blanc, quartz et amphibole; traces finement disséminées de sulfures (Py, Cpy) à plusieurs endroits.	
HAI-R 43	68 60 90	218 91 83	0	310	Jean Rabel (Vert de gris) : similaire à HAI-R-041 et 042, mais plus grossière et apparemment plus dioritique; porphyres de feldspath blanc jusqu'à 3-4 mm.; zones fracturées rouillées et taches de malachite dispersées.	
HAI-R 44	68 61 81	218 93 94	0	310	Jean Rabel (Vert de gris): diorite porphyrique similaire à HAI-R-043; à plusieurs endroits, roche rouillée avec taches de malachite, particulièrement dans les zones fracturées.	
HAI-R 45	68 61 81	218 93 94	0	310	Jean Rabel (Vert de gris): diorite porphyrique similaire à HAI-R-043; à plusieurs endroits, roche rouillée avec taches de malachite, particulièrement dans les zones fracturées (prélevé à 10-15 m. de HAI-R-44).	
HAI-R 46	68 73 99	218 86 68	0	110	Jean Rabel (Vert de gris) : 110 (?) ou 310 (?) porphyrique, à porphyres de feldspath blanc rosé (peut-être quartz) dans une matrice fine gris rosé-verdâtre; <0.5% Py finement disséminée et en petits amas; un peu de biotite.	

**Note :** La série d'échantillons **T** est le levé géochimique régional de roches. La série d'échantillons **HAI-R** est le levé d'indices minéralisés régional. La valeur accordée aux résultats d'analyse sous la limite de détection est 0. La valeur absente se note par **N / A**. Échantillonnage et validation des données réalisés par Valentino Nelson et J. W. Colas pour les comptes de SODEMINE (2018).

SODEMINE, S.A.					RAPPORT
Échantillonnage de roches de la région de Terre Neuve					N°:C-2018 36 / 49
No. (Échantillon)	UTM Est	UTM Nord	Au (ppm)	Indice altération	DESCRIPTION
HAI-R 47	68 72 66	218 89 70	0.12	110	Jean Rabel (Vert de gris) : 110 (?) ou 310 (?) porphyrique, à porphyres de feldspath et quartz, dans une matrice gris rosé pâle à moyen; Py et Cpy (de traces à <1%) finement disséminée et en petits amas; un peu d'amphibole.
HAI-R 48	69 32 76	218 66 22	0.02	410	Jean Rabel (La Bélée) : Assemblage d'intrusive felsique et de skarn calcosilicaté à grenat, feldspath et +/- pyroxène; pas de concentration d'oxydes observée; échantillon = typique de ce skarn; non-minéralisé à l'œil.
HAI-R 49	69 33 31	218 65 43	0.06	410	Jean Rabel (La Bélée) : petite zone (5 m. x 20 m.) contenant quelques blocs et petits affleurements de skarn, dont certains sont minéralisés en malachite et chalcosine; minéralisation varie de nulle à >20-30% chalcosine localement (enrichissement supergène?).
HAI-R 50	73 31 76	217 01 58	0.1	420	Bresiac, Tranchée #1, de 0.0 m. à 3.0 m.; station L32+00W/13+25N; skarn à grenat, de massif à légèrement fracturé, avec minéraux de métasomatisme (magnétite, calcite, +/- grenat et d'épidote) le long minces fractures; mouchetures occasionnelles de Cpy.
HAI-R 51	73 31 76	217 01 58	0.1	420	Bresiac, Tranchée #1, de 3.0 m. à 6.0 m.; skarn à grenat similaire à HAI-R-50; mouchetures occasionnelles de Cpy.
HAI-R 52	73 31 76	217 01 58	0.38	420	Bresiac, Tranchée #1, de 6.0 m. à 9.0 m.; skarn à grenat similaire à HAI-R-50; mouchetures occasionnelles de Cpy.
<p><b>Note :</b> La série d'échantillons <b>T</b> est le levé géochimique régional de roches. La série d'échantillons <b>HAI-R</b> est le levé d'indices minéralisés régional. La valeur accordée aux résultats d'analyse sous la limite de détection est 0. La valeur absente se note par <b>N / A</b>. Échantillonnage et validation des données réalisés par Valentino Nelson et J. W. Colas pour les comptes de SODEMINE (2018).</p>					

SODEMINE, S.A.					RAPPORT
Échantillonnage de roches de la région de Terre Neuve					N°:C-2018 37 / 49
No. (Échantillon)	UTM Est	UTM Nord	Au (ppm)	Indice altération	DESCRIPTION
HAI-R 53	73 31 76	217 01 58	0.54	440	Bresiac, Tranchée #1, de 9.0 m. à 11.0 m.; skarn à grenat, similaire à HAI-R-50, recoupé par des veines et lentilles irrégulières de calcite, magnétite, Cpy et +/- grenat et d'épidote.
HAI-R 54	73 31 76	217 01 58	1.83	440	Bresiac, Tranchée #1, de 11.0 m. à 13.0 m.; skarn à grenat, similaire à HAI-R-50, recoupé par des veines et lentilles irrégulières de calcite, magnétite, Cpy et +/- grenat et d'épidote.
HAI-R 55	73 31 76	217 01 58	0.25	440	Bresiac, Tranchée #1, de 13.0 m. à 16.0 m.; skarn à grenat, similaire à HAI-R-50, recoupé par quelques petites veines et lentilles irrégulières de calcite, magnétite, Cpy et +/- grenat et d'épidote.
HAI-R 56	73 35 60	217 02 73	0.32	420	Bresiac, Tranchée #2, de 0.0 m. à 5.0 m.; skarn à pyroxène dominant, avec marbre en quantité moindre; occasionnellement, disséminations, petits amas et minces filets de chalcopryrite et/ou chalcosine et/ou oxides de fer.
HAI-R 57	73 35 60	217 02 73	0.09	420	Bresiac, Tranchée #2, de 5.0 m. à 10.0 m.; skarn à pyroxène dominant, avec marbre en quantité moindre; occasionnellement, disséminations, petits amas et minces filets de chalcopryrite et/ou chalcosine et/ou oxides de fer.
HAI-R 58	73 35 60	217 02 73	0.23	420	Bresiac, Tranchée #2, de 10.0 m. à 15.0 m.; skarn à pyroxène dominant, avec marbre en quantité moindre; occasionnellement, disséminations, petits amas et minces filets de chalcopryrite et/ou chalcosine et/ou oxides de fer.
<p><b>Note :</b> La série d'échantillons <b>T</b> est le levé géochimique régional de roches. La série d'échantillons <b>HAI-R</b> est le levé d'indices minéralisés régional. La valeur accordée aux résultats d'analyse sous la limite de détection est 0. La valeur absente se note par <b>N/A</b>. Échantillonnage et validation des données réalisés par Valentino Nelson et J. W. Colas pour les comptes de SODEMINE (2018).</p>					

<b>SODEMINE, S.A.</b>						<b>RAPPORT</b>
<b>Échantillonnage de roches de la région de Terre Neuve</b>						<b>N°:C-2018</b> 38 / 49
<b>No. (Échantillon)</b>	<b>UTM Est</b>	<b>UTM Nord</b>	<b>Au (ppm)</b>	<b>Indice altération</b>	<b>DESCRIPTION</b>	
<b>HAI-R 59</b>	73 35 60	217 02 73	0.13	420	Bresiac, Tranchée #2, de 15.0 m. à 20.0 m.; skarn à pyroxène dominant, avec marbre en quantité moindre; occasionnellement, disséminations, petits amas et minces filets de chalcopryrite et/ou chalcosine et/ou oxides de fer.	
<b>HAI-R 60</b>	73 35 60	217 02 73	0.02	420	Bresiac, Tranchée #2, de 20.0 m. à 25.0 m.; skarn à pyroxène dominant, avec marbre en quantité moindre; occasionnellement, disséminations, petits amas et minces filets de chalcopryrite et/ou chalcosine et/ou oxides de fer.	
<b>HAI-R 61</b>	73 35 60	217 02 73	0.63	420	Bresiac, Tranchée #2, de 25.0 m. à 30.0 m.; skarn à pyroxène dominant, avec marbre en quantité moindre; occasionnellement, disséminations, petits amas et minces filets de chalcopryrite et/ou chalcosine et/ou oxides de fer.	
<b>HAI-R 62</b>	73 35 60	217 02 73	0.23	420	Bresiac, Tranchée #2, de 30.0 m. à 35.0 m.; skarn à pyroxène dominant, avec marbre en quantité moindre; occasionnellement, disséminations, petits amas et minces filets de chalcopryrite et/ou chalcosine et/ou oxides de fer.	
<b>HAI-R 63</b>	73 35 60	217 02 73	0.49	420	Bresiac, Tranchée #2, de 35.0 m. à 40.0 m.; skarn à pyroxène dominant, avec marbre en quantité moindre; occasionnellement, disséminations, petits amas et minces filets de chalcopryrite et/ou chalcosine et/ou oxides de fer.	
<b>HAI-R 64</b>	73 35 60	217 02 73	0.42	420	Bresiac, Tranchée #2, de 40.0 m. à 45.0 m.; skarn à pyroxène dominant, avec marbre en quantité moindre; occasionnellement, disséminations, petits amas et minces filets de chalcopryrite et/ou chalcosine et/ou oxides de fer.	
<p><b>Note :</b> La série d'échantillons <b>T</b> est le levé géochimique régional de roches. La série d'échantillons <b>HAI-R</b> est le levé d'indices minéralisés régional. La valeur accordée aux résultats d'analyse sous la limite de détection est 0. La valeur absente se note par <b>N / A</b>. Échantillonnage et validation des données réalisés par Valentino Nelson et J. W. Colas pour les comptes de SODEMINE (2018).</p>						

SODEMINE, S.A.					RAPPORT
Échantillonnage de roches de la région de Terre Neuve					N°:C-2018 39 / 49
No. (Échantillon)	UTM Est	UTM Nord	Au (ppm)	Indice altération	DESCRIPTION
<b>HAI-R 65</b>	73 35 60	217 02 73	0.18	420	Bresiac, Tranchée #2, de 45.0 m. à 50.0 m.; skarn à pyroxène dominant, avec marbre en quantité moindre; occasionnellement, disséminations, petits amas et minces filets de chalcopyrite et/ou chalcosine et/ou oxides de fer.
<b>HAI-R 66</b>	73 35 07	217 02 54	0.45	420	Bresiac, Tranchée #3, de 0.0 m. à 5.0 m.; assemblage de skarn à pyroxène et grenat (dominant) et de marbre (en quantité de marbre); par endroits, veinules et petits amas d'oxides de Fe; localement, petites concentrations de sulfures et carbonates de Cu.
<b>HAI-R 67</b>	73 35 07	217 02 54	0.21	420	Bresiac, Tranchée #3, de 0.0 m. à 10.0 m.; assemblage de skarn à pyroxène et grenat (dominant) et de marbre (en quantité de marbre); par endroits, veinules et petits amas d'oxides de Fe; localement, petites concentrations de sulfures et carbonates de Cu.
<b>HAI-R 68</b>	73 35 07	217 02 54	0.71	420	Bresiac, Tranchée #3, de 0.0 m. à 15.0 m.; assemblage de skarn à pyroxène et grenat (dominant) et de marbre (en quantité de marbre); par endroits, veinules et petits amas d'oxides de Fe; localement, petites concentrations de sulfures et carbonates de Cu.
<b>HAI-R 69</b>	73 35 07	217 02 54	0.45	420	Bresiac, Tranchée #3, de 0.0 m. à 20.0 m.; assemblage de skarn à pyroxène et grenat (dominant) et de marbre (en quantité de marbre); par endroits, veinules et petits amas d'oxides de Fe; localement, petites concentrations de sulfures et carbonates de Cu.

**Note :** La série d'échantillons **T** est le levé géochimique régional de roches. La série d'échantillons **HAI-R** est le levé d'indices minéralisés régional. La valeur accordée aux résultats d'analyse sous la limite de détection est 0. La valeur absente se note par **N / A**. Échantillonnage et validation des données réalisés par Valentino Nelson et J. W. Colas pour les comptes de SODEMINE (2018).

SODEMINE, S.A.					RAPPORT
Échantillonnage de roches de la région de Terre Neuve					N°:C-2018 40 / 49
No. (Échantillon)	UTM Est	UTM Nord	Au (ppm)	Indice altération	DESCRIPTION
HAI-R 70	73 35 07	217 02 54	0.44	420	Bresiac, Tranchée #3, de 0.0 m. à 25.0 m.; assemblage de skarn à pyroxène et grenat (dominant) et de marbre (en quantité de marbre); par endroits, veinules et petits amas d'oxides de Fe; localement, petites concentrations de sulfures et carbonates de Cu.
HAI-R 71	73 35 07	217 02 54	1.24	430	Bresiac; concentration de blocs sub-en-place (aire d'environ 10 à 12 mètres de diamètre) composés d'oxides de Fe semi-massif à massif avec, par endroits, +/- chalcosine, chalcopyrite et malachite.
HAI-R 72	73 34 92	217 02 58	0.06	390	Bresiac, Tunnel #1, de 0.0 à 5.0 m. de l'entrée; entrée de tunnel à environ 30 m. à l'ouest de la tranchée #3; assemblage de skarn à grenat et d'intrusif felsique à grain fin; peu ou non-minéralisé.
HAI-R 73	73 34 92	217 02 58	0.21	390	Bresiac, Tunnel #1, de 5.0 à 10.0 m. de l'entrée; assemblage de skarn à grenat et d'intrusif felsique à grain fin; peu ou non-minéralisé.
HAI-R 74	73 34 92	217 02 58	0.03	390	Bresiac, Tunnel #1, de 10.0 à 15.0 m. de l'entrée; assemblage de skarn à grenat et d'intrusif felsique à grain fin; peu ou non-minéralisé.
HAI-R 75	73 34 92	217 02 58	0.02	390	Bresiac, Tunnel #1, de 15.0 à 20.0 m. de l'entrée; assemblage de skarn à grenat et d'intrusif felsique à grain fin; peu ou non-minéralisé.
HAI-R 76	73 34 92	217 02 58	0.03	390	Bresiac, Tunnel #1, de 20.0 à 25.0 m. de l'entrée; assemblage de skarn à grenat et d'intrusif felsique à grain fin; peu ou non-minéralisé.
HAI-R 77	73 34 92	217 02 58	0.06	390	Bresiac, Tunnel #1, de 25.0 à 32.0 m. de l'entrée; assemblage de skarn à grenat et d'intrusif felsique à grain fin; peu ou non-minéralisé.

**Note :** La série d'échantillons **T** est le levé géochimique régional de roches. La série d'échantillons **HAI-R** est le levé d'indices minéralisés régional. La valeur accordée aux résultats d'analyse sous la limite de détection est 0. La valeur absente se note par **N / A**. Échantillonnage et validation des données réalisés par Valentino Nelson et J. W. Colas pour les comptes de SODEMINE (2018).

SODEMINE, S.A.					RAPPORT
Échantillonnage de roches de la région de Terre Neuve					N°:C-2018 41 / 49
No. (Échantillon)	UTM Est	UTM Nord	Au (ppm)	Indice altération	DESCRIPTION
<b>HAI-R 78</b>	73 34 92	217 02 58	0.05	390	Bresiac, Tunnel #1, embranchement vers le nord de 5 m. de longueur débutant à 28 m. de l'entrée du tunnel; assemblage de skarn à grenat et d'intrusif felsique à grain fin; peu ou non-minéralisé.
<b>HAI-R 79</b>	73 35 91	217 00 96	0.89	420	Bresiac, Tranchée #4, de 0.0 à 2.0 m.; skarn à grenat contenant des quantités variables de minéralisation (oxides de fer, chalcosine et chalcopryrite) disséminée et/ou en petites veines et amas irréguliers; distribution irrégulière de la minéralisation.
<b>HAI-R 80</b>	73 35 91	217 00 96	0.6	420	Bresiac, Tranchée #4, de 2.0 à 4.0 m.; skarn à grenat contenant des quantités variables de minéralisation (oxides de fer, chalcosine et chalcopryrite) disséminée et/ou en petites veines et amas irréguliers; distribution irrégulière de la minéralisation.
<b>HAI-R 81</b>	73 35 91	217 00 96	0.59	420	Bresiac, Tranchée #4, de 4.0 à 5.5 m.; skarn à grenat contenant des quantités variables de minéralisation (oxides de fer, chalcosine et chalcopryrite) disséminée et/ou en petites veines et amas irréguliers; distribution irrégulière de la minéralisation.
<b>HAI-R 82</b>	73 35 91	217 00 96	3.43	420	Bresiac, Tranchée #4, de 5.5 à 7.0 m.; skarn à grenat contenant des quantités variables de minéralisation (oxides de fer, chalcosine et chalcopryrite) disséminée et/ou en petites veines et amas irréguliers; distribution irrégulière de la minéralisation.
<b>HAI-R 83</b>	73 35 91	217 00 96	3.2	420	Bresiac, Tranchée #4, de 9.0 à 10.5 m.; skarn à grenat contenant des quantités variables de minéralisation (oxides de fer, chalcosine et chalcopryrite) disséminée et/ou en petites veines et amas irréguliers; distribution irrégulière de la minéralisation.

**Note :** La série d'échantillons **T** est le levé géochimique régional de roches. La série d'échantillons **HAI-R** est le levé d'indices minéralisés régional. La valeur accordée aux résultats d'analyse sous la limite de détection est 0. La valeur absente se note par **N / A**. Échantillonnage et validation des données réalisés par Valentino Nelson et J. W. Colas pour les comptes de SODEMINE (2018).

SODEMINE, S.A.					RAPPORT
Échantillonnage de roches de la région de Terre Neuve					N°:C-2018 42 / 49
No. (Échantillon)	UTM Est	UTM Nord	Au (ppm)	Indice altération	DESCRIPTION
HAI-R 84	73 35 91	217 00 96	0.07	420	Bresiac, Tranchée #4, de 19.0 à 22.0 m.; skarn à grenat contenant des quantités variables de minéralisation (oxides de fer, chalcosine et chalcopryrite) disséminée et/ou en petites veines et amas irréguliers; distribution irrégulière de la minéralisation.
HAI-R 85	73 35 91	217 00 96	0.06	420	Bresiac, Tranchée #4, de 22.0 à 25.0 m.; skarn à grenat contenant des quantités variables de minéralisation (oxides de fer, chalcosine et chalcopryrite) disséminée et/ou en petites veines et amas irréguliers; distribution irrégulière de la minéralisation.
HAI-R 86	73 35 91	217 00 96	0.02	420	Bresiac, Tranchée #4, de 25.0 à 27.0 m.; skarn à grenat contenant des quantités variables de minéralisation (oxides de fer, chalcosine et chalcopryrite) disséminée et/ou en petites veines et amas irréguliers; distribution irrégulière de la minéralisation.
HAI-R 87	73 35 91	217 00 96	3.5	430	Bresiac, Tranchée #5; échantillon représentatif de l'ensemble de la tranchée (environ 3-4 m. x 5.5 m.); skarn à grenat recoupé par une bande massive d'oxides de Fe, de chalcosine et de Cpy (environ 30 cm. épaisseur); voir échantillon HAI-R-25.
HAI-R 88	73 35 91	217 00 96	0.18	420	Bresiac, Tunnel #2, de 0.0 à 3.0 m. (escarpement à l'entrée du tunnel); skarn à grenat contenant quelques peu de minéralisation (oxides de Fe, chalcosine et chalcopryrite) disséminée et/ou en veines et/ou en amas, distribuée irrégulièrement.
HAI-R 89	73 35 91	217 00 96	0.12	420	Bresiac, Tunnel #2, de 3.0 à 6.0 m. (escarpement à l'entrée du tunnel); skarn à grenat contenant quelques peu de minéralisation (oxides de Fe, chalcosine et chalcopryrite) disséminée et/ou en veines et/ou en amas, distribuée irrégulièrement.

**Note :** La série d'échantillons **T** est le levé géochimique régional de roches. La série d'échantillons **HAI-R** est le levé d'indices minéralisés régional. La valeur accordée aux résultats d'analyse sous la limite de détection est 0. La valeur absente se note par **N / A**. Échantillonnage et validation des données réalisés par Valentino Nelson et J. W. Colas pour les comptes de SODEMINE (2018).

SODEMINE, S.A.					RAPPORT
Échantillonnage de roches de la région de Terre Neuve					N°:C-2018 43 / 49
No. (Échantillon)	UTM Est	UTM Nord	Au (ppm)	Indice altération	DESCRIPTION
<b>HAI-R 90</b>	73 35 91	217 00 96	0.4	420	Bresiac, Tunnel #2, de 6.0 à 9.0 m. (entrée du tunnel à 6.0 m.); skarn à grenat contenant quelques peu de minéralisation (oxides de Fe, chalcosine et chalcopryrite) disséminée et/ou en veines et/ou en amas, distribuée irrégulièrement.
<b>HAI-R 91</b>	73 35 91	217 00 96	0.16	420	Bresiac, Tunnel #2, de 9.0 à 12.0 m.; skarn à grenat contenant quelques peu de minéralisation (oxides de Fe, chalcosine et chalcopryrite) disséminée et/ou en veines et/ou en amas, distribuée irrégulièrement.
<b>HAI-R 92</b>	73 35 91	217 00 96	0.06	420	Bresiac, Tunnel #2, de 12.0 à 15.0 m.; skarn à grenat contenant quelques peu de minéralisation (oxides de Fe, chalcosine et chalcopryrite) disséminée et/ou en veines et/ou en amas, distribuée irrégulièrement.
<b>HAI-R 93</b>	73 35 91	217 00 96	0.11	420	Bresiac, Tunnel #2, de 15.0 à 18.0 m.; skarn à grenat contenant quelques peu de minéralisation (oxides de Fe, chalcosine et chalcopryrite) disséminée et/ou en veines et/ou en amas, distribuée irrégulièrement.
<b>HAI-R 94</b>	73 35 91	217 00 96	0.19	420	Bresiac, Tunnel #2, de 18.0 à 21.0 m.; skarn à grenat contenant quelques peu de minéralisation (oxides de Fe, chalcosine et chalcopryrite) disséminée et/ou en veines et/ou en amas, distribuée irrégulièrement.
<b>HAI-R 95</b>	73 35 91	217 00 96	0.47	420	Bresiac, embranchement débutant à 14 m. de l'entrée du Tunnel #2 (de 0.0 à 3.0 m. le long de l'embranchement); skarn à grenat contenant quelques peu de minéralisation (oxides de Fe, chalcosine et chalcopryrite), similaire au restant du tunnel.

**Note :** La série d'échantillons **T** est le levé géochimique régional de roches. La série d'échantillons **HAI-R** est le levé d'indices minéralisés régional. La valeur accordée aux résultats d'analyse sous la limite de détection est 0. La valeur absente se note par **N / A**. Échantillonnage et validation des données réalisés par Valentino Nelson et J. W. Colas pour les comptes de SODEMINE (2018).

SODEMINE, S.A.					RAPPORT
Échantillonnage de roches de la région de Terre Neuve					N°:C-2018 44 / 49
No. (Échantillon)	UTM Est	UTM Nord	Au (ppm)	Indice altération	DESCRIPTION
<b>HAI-R 96</b>	73 35 91	217 00 96	0.37	420	Bresiac, embranchement débutant à 14 m. de l'entrée du Tunnel #2 (de 3.0 à 6.0 m. le long de l'embranchement); skarn à grenat contenant quelques peu de minéralisation (oxides de Fe, chalcosine et chalcopyrite), similaire au restant du tunnel.
<b>HAI-R 97</b>	73 35 91	217 00 96	0.2	420	Bresiac, embranchement débutant à 14 m. de l'entrée du Tunnel #2 (de 6.0 à 9.5 m. le long de l'embranchement); skarn à grenat contenant quelques peu de minéralisation (oxides de Fe, chalcosine et chalcopyrite), similaire au restant du tunnel.
<b>HAI-R 98</b>	73 35 91	217 00 96	0.06	300	Bresiac, Tunnel #3; échantillon représentatif de l'ensemble du tunnel d'une profondeur de 14 m., composé d'intrusif felsique à grain fin sans minéralisation visible, sauf un peu de malachite qui a percolé dans les fractures près de l'entrée.
<b>HAI-R 99</b>	73 35 91	217 00 96	0.95	420	Bresiac, Tunnel #4; espacement de 3 m. de long creusé à l'entrée du tunnel (tunnel de 3 m. de long, plafond instable); skarn à grenat contenant quelques disséminations, veines et/ou en amas d'oxides de Fe, chalcosine et Cpy distribués irrégulièrement.
<b>HAI-R 100</b>	73 28 92	216 87 38	0.1	110	Secteur Caye Brûlée; zone de cisaillement (2.5 m. largeur totale) avec veines de quartz, recoupant volcaniques; échantillon de 0.5 m. de longueur au travers d'une zone à malachite et hématite.
<b>HAI-R 101</b>	73 28 92	216 87 38	0.03	110	Secteur Caye Brûlée; zone de cisaillement (2.5 m. largeur totale) avec veines de quartz, recoupant volcaniques; échantillon de 2 m. de longueur, adajacent à l'échantillon HAI-R-100 (roche apparemment non-minéralisée).

**Note :** La série d'échantillons **T** est le levé géochimique régional de roches. La série d'échantillons **HAI-R** est le levé d'indices minéralisés régional. La valeur accordée aux résultats d'analyse sous la limite de détection est 0. La valeur absente se note par **N / A**. Échantillonnage et validation des données réalisés par Valentino Nelson et J. W. Colas pour les comptes de SODEMINE (2018).

SODEMINE, S.A.					RAPPORT
Échantillonnage de roches de la région de Terre Neuve					N°:C-2018 45 / 49
No. (Échantillon)	UTM Est	UTM Nord	Au (ppm)	Indice altération	DESCRIPTION
HAI-R 102	73 35 91	217 00 96	0.03	410	Bresiac, Tranchée #5; prélevé à l'extrémité sud de la tranchée; skarn à grenat traversé par des veinules de quartz; roche d'apparence stérile.
HAI-R 103	73 19 79	217 01 27	0.05	310	Secteur Boisneuf; intrusive felsique recoupé par veines et veinules de quartz et de carbonates (300°/60-80°); ici et là, petites taches isolées de malachite, surtout dans la partie est de l'affleurement : secteur de l'anomalie de sol de Boisneuf.
HAI-R 104	72 27 99	217 75 96	0.87	330	Nan Vincent; Porphyre cuprifère à texture fine avec malachite et, par endroits, un peu de Cpy et chalcosine; le porphyre recoupe de l'andésite grise équigranulaire à grain fin-moyen; éclats de roche prélevés sur une largeur de 2.0 m. (+/- enrichi).
HAI-R 105	72 27 99	217 75 96	0.1	330	Nan Vincent; Porphyre cuprifère à texture fine similaire à HAI-R-104; éclats de roche prélevés sur une largeur de 2.0 m. (+/- enrichi), dans la continuité de l'échantillon HAI-R-104 (total de 4.0 m. échantillonné).
HAI-R 106	73 88 21	216 31 92	0.04	310	Boucan Grandeur; intrusive felsique recoupé par veines et veinules de quartz et de carbonates; petites taches de malachite (traces) observées à un seul endroit de Boucan, dans une tranchée.
HAI-R 1001	73 59 75	216 68 50	-1	400	Casséus; Coordonnées UTM = tranchée #1.
HAI-R 1002	73 59 75	216 68 50	-1	400	Casséus; Coordonnées UTM = tranchée #1.
HAI-R 1003	73 59 75	216 68 50	-1	400	Casséus; Coordonnées UTM = tranchée #1.
HAI-R 1004	73 59 75	216 68 50	-1 5.22	400	Casséus; Coordonnées UTM = tranchée #1.
HAI-R 1005	73 59 75	216 68 50	-1	400	Casséus; Coordonnées UTM = tranchée #1.

**Note :** La série d'échantillons **T** est le levé géochimique régional de roches. La série d'échantillons **HAI-R** est le levé d'indices minéralisés régional. La valeur accordée aux résultats d'analyse sous la limite de détection est 0. La valeur absente se note par **N / A**. Échantillonnage et validation des données réalisés par Valentino Nelson et J. W. Colas pour les comptes de SODEMINE (2018).

SODEMINE, S.A.					RAPPORT
Échantillonnage de roches de la région de Terre Neuve					N°:C-2018 46 / 49
No. (Échantillon)	UTM Est	UTM Nord	Au (ppm)	Indice altération	DESCRIPTION
HAI-R 1006	73 59 75	216 68 50	-1	400	Casséus; Coordonnées UTM = tranchée #1.
HAI-R 1007	73 59 75	216 68 50	-1	400	Casséus; Coordonnées UTM = tranchée #1.
HAI-R 1008	73 59 75	216 68 50	-1	400	Casséus; Coordonnées UTM = tranchée #1.
HAI-R 1009	73 59 75	216 68 50	-1	400	Casséus; Tranchée #2.
HAI-R 1010	73 59 75	216 68 50	-1	400	Casséus; Tranchée #2.
HAI-R 1011	73 59 75	216 68 50	-1	400	Casséus; Tranchée #2.
HAI-R 1012	73 59 75	216 68 50	-1	400	Casséus; Tranchée #2.
HAI-R 1013	73 59 75	216 68 50	-1	400	Casséus; Tranchée #2.
HAI-R 1014	73 59 75	216 68 50	-1	400	Casséus; Tranchée #2.
HAI-R 1015	73 59 75	216 68 50	-1	400	Casséus; Tunnel #1.
HAI-R 1016	73 59 75	216 68 50	-1	400	Casséus; Tunnel #1.
HAI-R 1017	73 59 75	216 68 50	-1	400	Casséus; Tunnel #1.
HAI-R 1018	73 59 75	216 68 50	-1	400	Casséus; Tunnel #1.
HAI-R 1019	73 59 75	216 68 50	-1	400	Casséus; Tunnel #1.
HAI-R 1020	73 59 75	216 68 50	-1	400	Casséus; Tunnel #1.
HAI-R 1021	73 59 75	216 68 50	-1	400	Casséus; Tunnel #1.
HAI-R 1022	73 59 75	216 68 50	-1	400	Casséus; Tunnel #1.
HAI-R 1023	73 59 75	216 68 50	-1	400	Casséus; Tunnel #1.
HAI-R 1024	73 59 75	216 68 50	-1	400	Casséus; Tunnel #1.

**Note :** La série d'échantillons **T** est le levé géochimique régional de roches. La série d'échantillons **HAI-R** est le levé d'indices minéralisés régional. La valeur accordée aux résultats d'analyse sous la limite de détection est 0. La valeur absente se note par N / A. Échantillonnage et validation des données réalisés par Valentino Nelson et J. W. Colas pour les comptes de SODEMINE (2018).

SODEMINE, S.A.					RAPPORT
Échantillonnage de roches de la région de Terre Neuve					N°:C-2018 47 / 49
No. (Échantillon)	UTM Est	UTM Nord	Au (ppm)	Indice altération	DESCRIPTION
HAI-R 1025	73 59 75	216 68 50	-1 3.34	400	Casséus; Tunnel #1.
HAI-R 1026	73 59 75	216 68 50	-1	400	Casséus; Tunnel #1.
HAI-R 1027	73 59 75	216 68 50	-1	400	Casséus; Tunnel #1.
HAI-R 1028	73 59 75	216 68 50	-1	400	Casséus; Tunnel #1.
HAI-R 1029	73 59 75	216 68 50	-1	400	Casséus; Tunnel #1.
HAI-R 1030	73 59 75	216 68 50	-1	400	Casséus; Tunnel #1.
HAI-R 1031	73 59 75	216 68 50	-1	400	Casséus; Tunnel #1.
HAI-R 1032	73 59 75	216 68 50	-1	400	Casséus; Tunnel #1.
HAI-R 1033	73 59 75	216 68 50	-1	400	Casséus; Tunnel #4.
HAI-R 1034	73 59 75	216 68 50	-1	400	Casséus; Tunnel #4.
HAI-R 1035	73 59 75	216 68 50	-1	400	Casséus; Tunnel #4.
HAI-R 1036	71 63 08	217 87 56	0.03	100	Grain fin; équigranulaire; malachite et limonite dans fractures; magnétique.
HAI-R 1037	71 90 40	217 74 80	0	400	Métasomatisme (?); à grenat, calcite, malachite et chalcosine (de 15 à 20%); magnétique.
HAI-R 1038	72 23 57	217 71 88	0.03	110	Gris; grain fin équigranulaire; malachite et chalcosine; magnétique.
HAI-R 1039	71 64 41	217 87 19	0.04	100	Grain fin; vésiculaire; silicifié; magnétique; de 7 à 10% de malachite dans les fractures.
HAI-R 1040	71 75 25	217 84 48	0.11	120	Grain fin; altération en limonite; magnétique; de 10 à 15% de chalcosine, chalcopyrite et malachite.

**Note :** La série d'échantillons **T** est le levé géochimique régional de roches. La série d'échantillons **HAI-R** est le levé d'indices minéralisés régional. La valeur accordée aux résultats d'analyse sous la limite de détection est 0. La valeur absente se note par **N / A**. Échantillonnage et validation des données réalisés par Valentino Nelson et J. W. Colas pour les comptes de SODEMINE (2018).

SODEMINE, S.A.					RAPPORT
Échantillonnage de roches de la région de Terre Neuve					N°:C-2018 48 / 49
No. (Échantillon)	UTM Est	UTM Nord	Au (ppm)	Indice altération	DESCRIPTION
HAI-R 1041	73 06 04	217 51 12	0.02	120	Gris-vert; grain fin; vésiculaire; placages de malachite dans les fractures.
HAI-R 1042	72 94 95	217 72 32	0.03	1000	Veine de quartz localement imprégnée de malachite; largeur de 60-70 cm.
HAI-R 22	73 32 06	217 01 58	-1	440	Bresiac; Échantillon bien choisi provenant d'une zone lenticulaire de forme irrégulière (veine) à texture grossière, encaissée dans du skarn riche en grenat; très localement, certaines concentrations de Cpy peuvent atteindre >10%; jusqu'à 5-10% oxides Fe.
HAI-R 23	73 32 06	217 01 58	-1	412	Bresiac; Échantillon provenant de la marge épidotisée entourant les veines minéralisées à texture grossière; contient un peu de chalcopryrite visible; le skarn encaissant est peu ou non-minéralisé; radioactivité : 25-35 cps (bruit de fond relativement bas).
HAI-R 24	73 35 44	217 01 60	-1	440	Bresiac; Bloc de skarn détaché de la falaise; skarn à grenat beige avec passées riches en oxides de fer (principalement dans fractures et interstices de brèche); Cpy jusqu'à quelques % localement, surtout associée aux oxides; radiométrie : 30-40 cps.
HAI-R 25	73 35 68	217 01 30	-1	430	Bresiac; Échantillon provenant d'une bande distincte riche en oxides de fer, chalcosine et chalcopryrite; cette bande (environ 30 cm. d'épaisseur) recoupe du skarn à grenat beige (rouge mineur) à grain fin, généralement peu minéralisée.
<p><b>Note :</b> La série d'échantillons <b>T</b> est le levé géochimique régional de roches. La série d'échantillons <b>HAI-R</b> est le levé d'indices minéralisés régional. La valeur accordée aux résultats d'analyse sous la limite de détection est 0. La valeur absente se note par <b>N / A</b>. Échantillonnage et validation des données réalisés par Valentino Nelson et J. W. Colas pour les comptes de SODEMINE (2018).</p>					



#### D.4 ÉCHANTILLONNAGES & LEVÉS GÉOCHIMIQUES <sup>68</sup>

Des levés géochimiques ont été réalisés sur l'ensemble des permis de prospection. La priorité est accordée aux secteurs constitués de roches d'âge Crétacé considérant que celles-ci contiennent tous les indices minéralisés d'intérêt. Seuls quelques indices mineurs sont connus dans les roches tertiaires et semblent situer juste au-dessus de la discordance.

L'objectif de ces levés est de définir des patrons géochimiques et d'établir un parallèle avec des modèles connus. Trois à quatre échantillons ont été prélevés par kilomètre carré de façon aléatoire. Chaque échantillon était constitué d'environ 5 kg d'éclat de roche. La position des échantillons a été définie par GPS et clairement identifiée sur le terrain par des rubans indiquant le numéro de l'échantillon. Un total de 392 échantillons ont été prélevés (Musée du BME) et analysés par Chimitec (Laboratoire indépendant situé à Val d'Or, Québec).

Le tableau suivant liste les éléments déterminés, les méthodes d'extractions et d'analyses, les unités de teneurs pour chaque élément et les limites inférieures et supérieures de détection des méthodes d'analyse utilisées.

---

<sup>68</sup> La problématique est de type infrastructure échantillonnée. L'échantillonnage et les essais sont coûteux en mécanique des roches. Les données corrélées ne suffisent pas pour combler la nature géologique de l'approche systémique au sein de l'environnement. En conclusion : le modèle contient des biais.

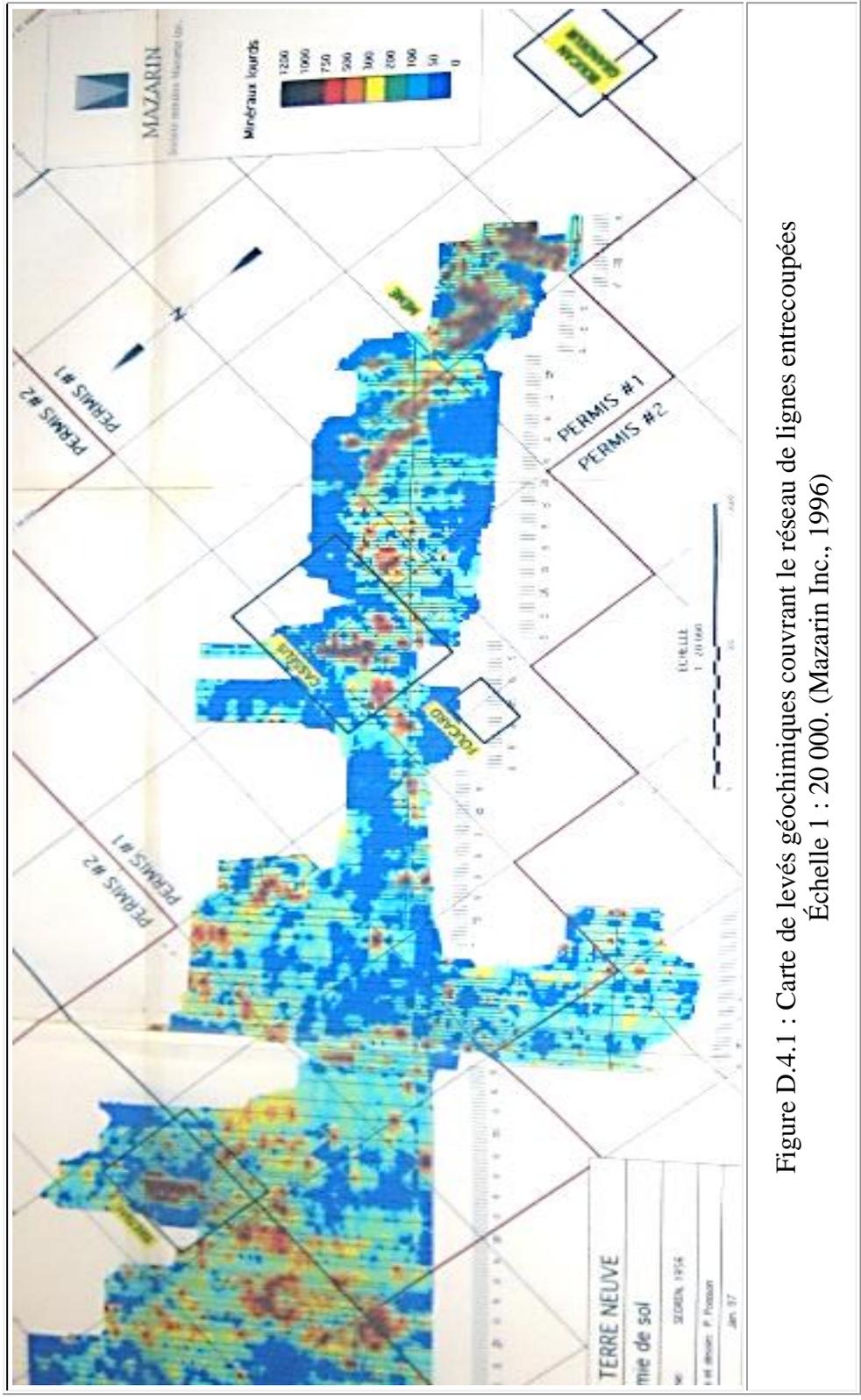


Figure D.4.1 : Carte de levés géochimiques couvrant le réseau de lignes entrecoupées  
Échelle 1 : 20 000. (Mazarin Inc., 1996)

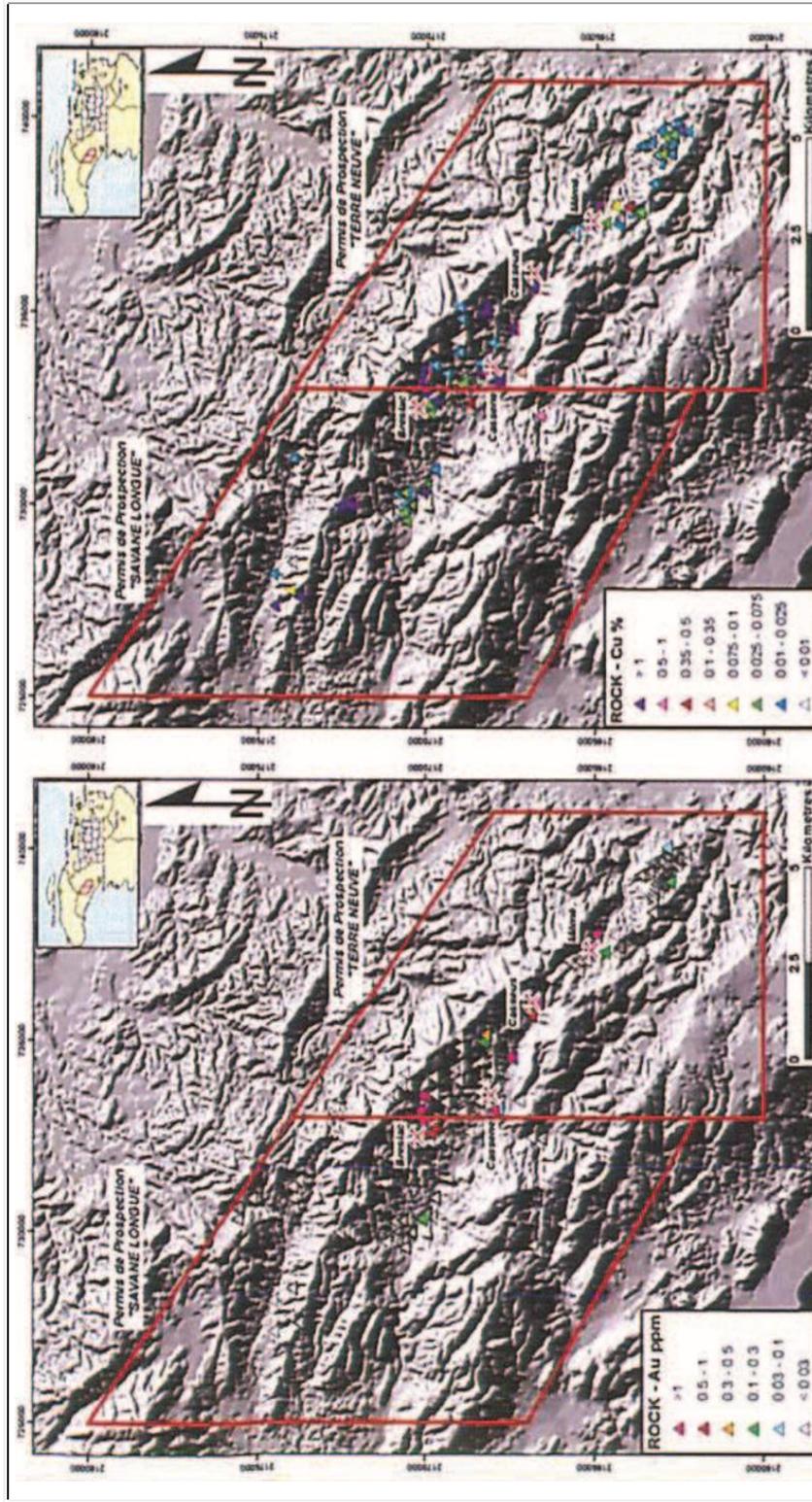


Figure D.4.2 : Résultats d'analyse pour l'or (à gauche) et le cuivre (à droite) dans les échantillons de roches collectés à Terre Neuve et Savane Longue (Marien mining compagny S. A, 2011)

<b>INCHCAPE TESTING SERVICES / CHIMITEC LTÉE</b> <b>1322, rue Harricana Val d'Or, Québec J9P 3X6</b> <b>Tél. : (819) 825-0178</b>						<b>RAPPORT</b> <b>N°</b> <b>C96-64719.0</b>
<b>Levés géochimiques de la région de Terre Neuve</b>						1 / 6
Éléments	Extraction	Méthode d'analyse	Unités	Limite inférieure	Limite supérieure	<b>Validation des données:</b>  Lorsque les résultats d'un échantillon dépassent la limite supérieure de détection de la méthode d'analyse utilisée pour un élément particulier, cet échantillon est réanalysé pour cet élément en utilisant une méthode appropriée pour en définir la teneur réelle.
Au	Pyroanalyse 30 g	Abs. atomique	ppb	5	999999	
As		Act. neutronique	ppm	1.0	0000.0	
Sb		Act. neutronique	ppm	0.2	5000.0	
Cu	HCl : HNO <sub>3</sub> (3 : 1)	Abs. atomique	ppm	1	20000	
Pb	HCl : HNO <sub>3</sub> (3 : 1)	Abs. atomique	ppm	2	10000	
Zn	HCl : HNO <sub>3</sub> (3 : 1)	Abs. atomique	ppm	1	20000	
Mo	HCl : HNO <sub>3</sub> (3 : 1)	Abs. atomique	ppm	1	20000	
Ag	HCl : HNO <sub>3</sub> (3 : 1)	Abs. atomique	ppm	0.1	50.0	
Hg	HCl : HNO <sub>3</sub> (3 : 1)	Abs. atomique	ppm	0.010	50.000	
Ba	Induct. Coup. plasma	Fusion borate <sup>69</sup>	ppm	10	10000	
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Induct. Coup. plasma	Fusion borate	pct	0.001	00.000	
Sr	Induct. Coup. plasma	Fusion borate	ppm	5	10000	
<b>Note :</b> L'échantillonnage est de type : roche concassée, pulvérisée. Le nombre d'échantillons est de 68. La fraction utilisée est de 150.						Date: 2018
Liens avec le Rapport N° : C96-64719.0						
Rapport préparé par : Chimitec, ltée. Échantillonnage et validation des données réalisés par Valentino Nelson et J. W. Colas pour les comptes de SODEMINE (2018).						

<sup>69</sup> Le processus de fusion est en quelque sorte l'inverse du processus de cristallisation fractionnée. Si on augmente progressivement la température d'un matériel solide composé d'un assemblage de minéraux silicatés, cet assemblage passe entièrement ou partiellement de la phase solide à la phase liquide.

<b>INCHCAPE TESTING SERVICES / CHIMITEC LTÉE</b> <b>1322, rue Harricana Val d'Or, Québec J9P 3X6</b> <b>Tél. : (819) 825-0178</b>						<b>RAPPORT</b> <b>N°</b> <b>C96-64719.0</b>
<b>Levés géochimiques de la région de Terre Neuve</b>						2 / 6
Éléments	Extraction	Méthode d'analyse	Unités	Limite inférieure	Limite supérieure	<b>Validation des données:</b>  Lorsque les résultats d'un échantillon dépassent la limite supérieure de détection de la méthode d'analyse utilisée pour un élément particulier, cet échantillon est réanalysé pour cet élément en utilisant une méthode appropriée pour en définir la teneur réelle.
SiO2	Induct. Coup. plasma	Fusion borate	pct	5	999999	
TiO2	Induct. Coup. plasma	Fusion borate	pct	1.0	0000.0	
Al2O3	Induct. Coup. plasma	Fusion borate	pct	0.2	5000.0	
Fe2O3	Induct. Coup. plasma	Fusion borate	pct	1	20000	
MnO	Induct. Coup. plasma	Fusion borate	pct	2	10000	
MgO	Induct. Coup. plasma	Fusion borate	pct	1	20000	
CaO	Induct. Coup. plasma	Fusion borate	pct	1	20000	
Na2O	Induct. Coup. plasma	Fusion borate	pct	0.1	50.0	
K2O	Induct. Coup. plasma	Fusion borate	pct	0.010	50.000	
P2O5	Induct. Coup. plasma	Fusion borate	pct	10	10000	
Perte / feu	Ignition 1000 degrés C	Gravimétrie	pct	0.001	00.000	
<b>TOTAL</b>			<b>pct</b>	<b>0.01</b>	<b>110.00</b>	
<b>Note :</b> L'échantillonnage est de type : roche concassée, pulvérisée. Le nombre d'échantillons est de 68. La fraction utilisée est de 150.						Date: 2018
Liens avec le Rapport N° : C96-64719.0 ( 1 / 6)						
Rapport préparé par : Chimitec, ltée. Échantillonnage et validation des données réalisés par Valentino Nelson et J. W. Colas pour les comptes de SODEMINE (2018).						

<b>INCHCAPE TESTING SERVICES / CHIMITEC LTÉE</b> <b>1322, rue Harricana Val d'Or, Québec J9P 3X6</b> <b>Tél. : (819) 825-0178</b>						<b>RAPPORT</b> <b>N°</b> <b>C96-64719.0</b>
<b>Levés géochimiques de la région de Terre Neuve</b>						3 / 6
<b>No.</b> <b>Échantillon</b>	<b>Au30</b> <b>(ppb)</b>	<b>Cu</b> <b>(ppm)</b>	<b>Cu</b> <b>(%)</b>	<b>Ag</b> <b>(ppm)</b>	<b>Pb</b> <b>(ppm)</b>	<b>Validation des résultats:</b>  Lorsque les résultats d'un échantillon dépassent la limite supérieure de détection de la méthode d'analyse utilisée pour un élément particulier, cet échantillon est réanalysé pour cet élément en utilisant une méthode appropriée pour en définir la teneur réelle.
HAI-R-001	10	> 20 000	8.62	18.4	77	
HAI-R-002	6	5599		3.7	258	
HAI-R-003	< 5	1645		0.3	430	
HAI-R-004	< 5	5337		1.2	39	
HAI-R-005	< 5	2146		0.5	111	
HAI-R-006	9	11 377		7.8	213	
HAI-R-007	8	> 20 000	6.83	> 50.0	132	
HAI-R-008	8	153		0.2	38	
HAI-R-009	18	> 20 000	4.11	2.8	827	
HAI-R-010	136	> 20 000	9.76	3.7	107	
HAI-R-011	7	390		0.4	79	
HAI-R-012	6	381		< 0.1	93	
HAI-R-013	< 5	> 20 000	9.10	> 50.0	70	
HAI-R-014	< 5	> 20 000	11.11	> 50.0	66	
HAI-R-015	123	> 20 000	10.82	> 50.0	4932	
HAI-R-016	7	> 20 000	5.23	4.7	107	
HAI-R-017	948	> 20 000	10.08	4.3	75	
HAI-R-018	9	327		1.8	70	
HAI-R-019	< 5	558		0.2	65	
HAI-R-020	< 5	115		0.2	46	
<b>Note :</b> L'échantillonnage est de type : roche concassée, pulvérisée. Le nombre d'échantillons est de 68. La fraction utilisée est de 150.						Date: 2018
Liens avec le Rapport N° : C96-64719.0						
Rapport préparé par : Chimitec, ltée. Échantillonnage et validation des données réalisés par Valentino Nelson et J. W. Colas pour les comptes de SODEMINE (2018).						

<b>INCHCAPE TESTING SERVICES / CHIMITEC LTÉE</b> <b>1322, rue Harricana Val d'Or, Québec J9P 3X6</b> <b>Tél. : (819) 825-0178</b>						<b>RAPPORT</b> <b>N°</b> <b>C96-64719.0</b>
<b>Levés géochimiques de la région de Terre Neuve</b>						4 / 6
No. Échantillon	Au30 (ppb)	Cu (ppm)	Ag (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)	<b>Validation des résultats:</b>  Lorsque les résultats d'un échantillon dépassent la limite supérieure de détection de la méthode d'analyse utilisée pour un élément particulier, cet échantillon est réanalysé pour cet élément en utilisant une méthode appropriée pour en définir la teneur réelle.
HAI-R-021	10	> 20 000	18.4	19	953	
HAI-R-022	6	5599	3.7	16	1356	
HAI-R-023	< 5	1645	0.3	16	37	
HAI-R-024	< 5	5337	1.2	10	375	
HAI-R-025	< 5	2146	0.5	11	271	
HAI-R-026	9	11 377	7.8	21	464	
HAI-R-027	8	> 20 000	> 50.0	38	677	
HAI-R-028	8	153	0.2	6	48	
HAI-R-029	18	> 20 000	2.8	23	11	
HAI-R-030	136	> 20 000	3.7	75	25	
HAI-R-031	7	390	0.4	14	89	
HAI-R-032	6	381	< 0.1	6	86	
HAI-R-033	< 5	> 20 000	> 50.0	24	35	
HAI-R-1 001	< 5	> 20 000	> 50.0	25		
HAI-R-1 002	123	> 20 000	> 50.0	1412		
HAI-R-1 003	7	> 20 000	4.7	23		
HAI-R-1 004	948	> 20 000	4.3	9		
HAI-R-1 005	9	327	1.8	15		
HAI-R-1 006	< 5	558	0.2	6		
HAI-R-1 007	< 5	115	0.2	7		
<b>Note :</b> L'échantillonnage est de type : roche concassée, pulvérisée. Le nombre d'échantillons est de 68. La fraction utilisée est de 150.						Date: 2018
Liens avec le Rapport N° : C96-64719.0 ( 3 / 6 )						
Rapport préparé par : Chimitec, ltée. Échantillonnage et validation des données réalisés par Valentino Nelson et J. W. Colas pour les comptes de SODEMINE (2018).						

<b>INCHCAPE TESTING SERVICES / CHIMITEC LTÉE</b> <b>1322, rue Harricana Val d'Or, Québec J9P 3X6</b> <b>Tél. : (819) 825-0178</b>				<b>RAPPORT</b> <b>N°</b> <b>C96-64719.0</b>  5 / 6
<b>Log lithochimique de la région de Terre Neuve</b>				
<b>MESURE Standard</b>	<b>Au30 (ppb)</b>	<b>Cu (ppm)</b>	<b>Cu (%)</b>	Validation des résultats:  Lorsque les résultats d'un échantillon dépassent la limite supérieure de détection de la méthode d'analyse utilisée pour un élément particulier, cet échantillon est réanalysé pour cet élément en utilisant une méthode appropriée pour en définir la teneur réelle.
BLANC	< 5	1	-	
BLANC	< 5	1	-	
BLANC	< 5	-	-	
Nb. D'analyses	3	2	-	
Valeur de Moyenne	2.5	1.0	-	
Écart-type	0.00	0.00	-	
Valeur acceptée	5	1	< 0.01	
<b>MESURE Standard</b>	<b>Au30 (ppb)</b>	<b>Cu (ppm)</b>	<b>Cu (pct)</b>	
Gannet standard	371	-	-	
Nb. D'analyses	1	-	-	
Valeur de Moyenne	371.3	-	-	
Écart-type	-	-	-	
Valeur acceptée	410	-	-	
Note : L'échantillonnage est de type : roche concassée, pulvérisée. Le nombre d'échantillons est de 68. La fraction utilisée est de 150.				Date: 2018
Liens avec le Rapport N° : C96-64719.0				
Rapport préparé par : Chimitec, ltée. Échantillonnage et validation des données réalisés par Valentino Nelson et J. W. Colas pour les comptes de SODEMINE (2018).				

<b>INCHCAPE TESTING SERVICES / CHIMITEC LTÉE</b> <b>1322, rue Harricana Val d'Or, Québec J9P 3X6</b> <b>Tél. : (819) 825-0178</b>				<b>RAPPORT</b> <b>N°</b> <b>C96-64719.0</b> <b>6 / 6</b>																												
<b>Log lithochimique de la région de Terre Neuve</b>																																
<table border="1"> <thead> <tr> <th><b>MESURE Standard</b></th> <th><b>Au30 (ppb)</b></th> <th><b>Cu (ppm)</b></th> <th><b>Cu (%)</b></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Standard géochimique 5</td> <td>&lt; 5</td> <td>1</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Nb. D'analyses</td> <td>3</td> <td>2</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Valeur de Moyenne</td> <td>2.5</td> <td>1.0</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Écart-type</td> <td>0.00</td> <td>0.00</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Valeur acceptée</td> <td>5</td> <td>1</td> <td>&lt; 0.01</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	<b>MESURE Standard</b>	<b>Au30 (ppb)</b>	<b>Cu (ppm)</b>	<b>Cu (%)</b>	Standard géochimique 5	< 5	1	-	Nb. D'analyses	3	2	-	Valeur de Moyenne	2.5	1.0	-	Écart-type	0.00	0.00	-	Valeur acceptée	5	1	< 0.01								<b>Validation des résultats:</b>  Lorsque les résultats d'un échantillon dépassent la limite supérieure de détection de la méthode d'analyse utilisée pour un élément particulier, cet échantillon est réanalysé pour cet élément en utilisant une méthode appropriée pour en définir la teneur réelle.
<b>MESURE Standard</b>	<b>Au30 (ppb)</b>	<b>Cu (ppm)</b>	<b>Cu (%)</b>																													
Standard géochimique 5	< 5	1	-																													
Nb. D'analyses	3	2	-																													
Valeur de Moyenne	2.5	1.0	-																													
Écart-type	0.00	0.00	-																													
Valeur acceptée	5	1	< 0.01																													
<table border="1"> <thead> <tr> <th><b>MESURE Standard</b></th> <th><b>Au30 (ppb)</b></th> <th><b>Cu (ppm)</b></th> <th><b>Cu (pct)</b></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Gannet standard</td> <td>371</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Nb. D'analyses</td> <td>1</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Valeur de Moyenne</td> <td>371.3</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Écart-type</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Valeur acceptée</td> <td>410</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	<b>MESURE Standard</b>	<b>Au30 (ppb)</b>	<b>Cu (ppm)</b>	<b>Cu (pct)</b>	Gannet standard	371	-	-	Nb. D'analyses	1	-	-	Valeur de Moyenne	371.3	-	-	Écart-type	-	-	-	Valeur acceptée	410	-	-								
<b>MESURE Standard</b>	<b>Au30 (ppb)</b>	<b>Cu (ppm)</b>	<b>Cu (pct)</b>																													
Gannet standard	371	-	-																													
Nb. D'analyses	1	-	-																													
Valeur de Moyenne	371.3	-	-																													
Écart-type	-	-	-																													
Valeur acceptée	410	-	-																													
<table border="1"> <thead> <tr> <th><b>MESURE Standard</b></th> <th><b>Au30 (ppb)</b></th> <th><b>Cu (ppm)</b></th> <th><b>Cu (pct)</b></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Gannet standard</td> <td>371</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Nb. D'analyses</td> <td>1</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Valeur de Moyenne</td> <td>371.3</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Écart-type</td> <td>-</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>Valeur acceptée</td> <td>410</td> <td>-</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	<b>MESURE Standard</b>	<b>Au30 (ppb)</b>	<b>Cu (ppm)</b>	<b>Cu (pct)</b>	Gannet standard	371	-	-	Nb. D'analyses	1	-	-	Valeur de Moyenne	371.3	-	-	Écart-type	-	-	-	Valeur acceptée	410	-	-								
<b>MESURE Standard</b>	<b>Au30 (ppb)</b>	<b>Cu (ppm)</b>	<b>Cu (pct)</b>																													
Gannet standard	371	-	-																													
Nb. D'analyses	1	-	-																													
Valeur de Moyenne	371.3	-	-																													
Écart-type	-	-	-																													
Valeur acceptée	410	-	-																													
Note : L'échantillonnage est de type : roche concassée, pulvérisée. Le nombre d'échantillons est de 68. La fraction utilisée est de 150.				Date: 2018																												
Liens avec le Rapport N° : C96-64719.0 ( 5/6)																																
Rapport préparé par : Chimitec, ltée. Échantillonnage et validation des données réalisés par Valentino Nelson et J. W. Colas pour les comptes de SODEMINE (2018).																																

Tableau D.1 : Échantillons prélevés dans le secteur Casséus (Sodemine, 2018)

Résultats (1/2)				Résultats (2/2)			
No.	Au30 (ppb)	Cu (ppm)	Ratio Au / Cu (X 1000)	No.	Au30 (ppb)	Cu (ppm)	Ratio Au / Cu (X 1000)
HAI-R-015	123	> 20 000	1.14	HAI-R-1 009	155	2882	53.78
HAI-R-016	7	> 20 000	0.13	HAI-R-1 010	82	2662	30.80
HAI-R-017	948	> 20 000	9.40	HAI-R-1 011	102	1374	74.24
HAI-R-018	9	327	27.52	HAI-R-1 012	475	10319	46.03
HAI-R-019	< 5	558	< 8.96	HAI-R-1 013	68	2852	23.84
HAI-R-020	< 5	115	< 43.48	HAI-R-1 014	213	8974	23.74
HAI-R-021	4939	160300	30.81	HAI-R-1 015	10	86	116.28
HAI-R-022	1148	223900	5.13	HAI-R-1 016	< 5	176	< 28.41
HAI-R-023	50	513	97.47	HAI-R-1 017	6	161	37.27
HAI-R-024	2060	28300	72.79	HAI-R-1 018	12	485	24.74
HAI-R-025	2042	284900	7.17	HAI-R-1 019	187	3324	56.26
HAI-R-026	1498	63100	23.74	HAI-R-1 020	89	18758	5.31
HAI-R-027	1303	53900	24.17	HAI-R-1 021	311	14068	22.11
HAI-R-028	8	323	24.77	HAI-R-1 022	58	2384	24.33
HAI-R-029	14	744	18.82	HAI-R-1 023	89	4049	21.98
HAI-R-030	8	632	12.66	HAI-R-1 024	249	13252	18.79
HAI-R-031	20	112	178.57	HAI-R-1 025	484	33400	14.43
HAI-R-032	< 5	17017	0.29	HAI-R-1 026	54	9335	5.78
HAI-R-033	136	2759	49.29	HAI-R-1 027	105	9823	10.69
HAI-R-1 001	752	4630	162.42	HAI-R-1 028	30	6509	4.61
HAI-R-1 002	84	5258	15.98	HAI-R-1 029	254	16543	15.35
HAI-R-1 003	91	6095	14.93	HAI-R-1 030	159	3844	41.36
HAI-R-1 004	529	52200	10.13	HAI-R-1 031	13	7729	1.68
HAI-R-1 005	240	7453	32.20	HAI-R-1 032	237	3890	60.93
HAI-R-1 006	265	18761	14.13	HAI-R-1 033	32	898	35.63
HAI-R-1 007	147	6998	21.01	HAI-R-1 034	< 5	4778	< 1.05
HAI-R-1 008	462	14804	31.21	HAI-R-1 035	282	5921	47.63

**ANNEXE E**  
**ÉVALUATION DES CONTRAINTES DE CONFINEMENT**  
**(SELON LES CRITÈRES DE DESIGN STRUCTURAL SÉLECTIONNÉS)**

**MÉTHODOLOGIE**

Essais de résistance :

ÉTAPE 01 : Classification des propriétés du massif rocheux

- Visite des lieux ( Cf. Annexe D)
- Données recueillies ( Cf. Annexe D)
- Classification du massif rocheux

ÉTAPE 02 : Estimation des corrélations paramétrées du massif rocheux

- Estimation des modèles systémiques (Q, RMR,GSI) .

ÉTAPE 03 : Analyse de modèles de critères de design structural sélectionnés

- L'implémentation du modèle est simulé avec des logiciels d'éléments finis PLAXIS V 8.2 et de différences finies (FLAC V 5.0).
- La théorie de Mohr-Coulomb dépend de 5 paramètres d'entrée, i.e. le module d'élasticité de Young (E), le ratio de Poisson ( $\nu$ );l'angle de friction interne ( $\Phi$ ) et la constante de cohésion (C) et l'angle de dilatance  $\psi$  .
- La théorie de Hoek-Brown dépend de 10 paramètres d'entrée, i.e. le module d'élasticité de Young (E), le ratio de Poisson ( $\nu$ ) et autres paramètres géotechniques (GSI,  $m_i$ , m, s,  $m_r$ ,  $s_r$ , E,  $\nu$ ,  $\sigma_{ci}$ , D etc.).
- Tous les paramètres élastiques sont pris selon les 2 critères de Mohr-Coulomb et Hoek-Brown et les paramètres sont calculés en utilisant le code RocLab.

#### ÉTAPE 04 : Classification des propriétés du massif rocheux

Des données géomécaniques sont recueillies après la visite du site; nos connaissances colligées sur les propriétés nous permettent de procéder à l'évaluation de la qualité du massif rocheux.

#### Calculs-types pour les essais de fluage:

Détermination du module de Young [ $E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon}$ ], du coefficient de Poisson et de la contrainte de résistance par essai de compression uniaxiale.

D' après la Figure E.1, les modules sont les pentes des tangentes aux droites.

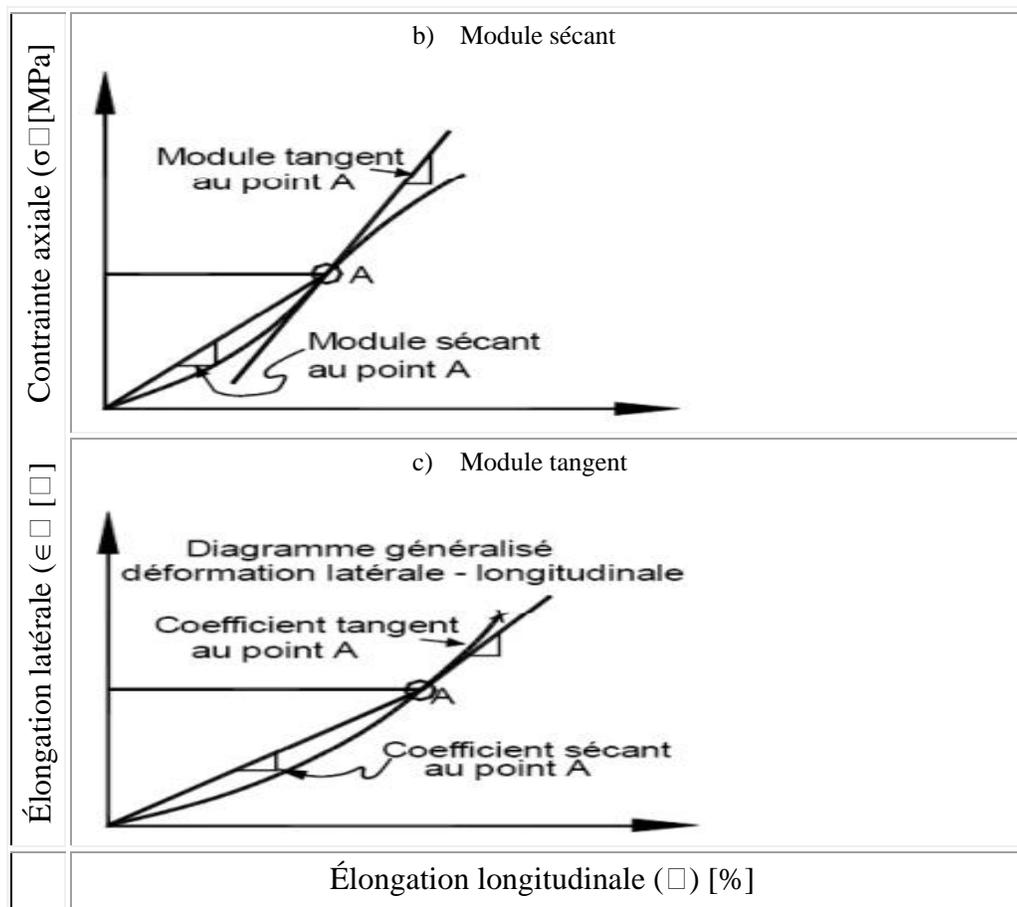


Figure E.2 : Généralités sur des modules sécants et tangents

Tableau E.1 : Calculs-types pour l'essai de compression uniaxiale 3

UN-3		microdéformation (symbole : $\mu\text{def}$ ) (1.000 $\mu\text{def}$ = 0.1%).									
Diamètre (mm)	40.78										
Aire (mm <sup>2</sup> )	1306.12										
Longueur (mm)	91.53										
Force	Contrainte	Jauge Axiale 1	Jauge Axiale 2	Moyen(Axiale 1 et 2)	Déformation	Jauge Transv. 1	Jauge Transv. 2	Moyen(Transv 1 et 2)	Déformation	$\epsilon$ (%)	
N	$\sigma=P/D$ (Mpa)	microdef	microdef	microdef	$\epsilon$ (%)	microdef	microdef	microdef	$\epsilon$ (%)		
99	0.0757968	-3	-5	-4	0.0004	0	2	1	-0.0001		
99	0.0757968	-1	-3	-2	0.0002	3	3	3	-0.0003		
131	0.100296776	-1	-2	-1.5	0.00015	3	5	4	-0.0004		
131	0.100296776	0	-3	-1.5	0.00015	5	3	4	-0.0004		
131	0.100296776	-1	-3	-2	0.0002	2	3	2.5	-0.00025		
197	0.150827976	-1	-2	-1.5	0.00015	3	5	4	-0.0004		
427	0.326921551	-9	-8	-8.5	0.00085	5	5	5	-0.0005		
493	0.377452751	-10	-8	-9	0.0009	5	3	4	-0.0004		
526	0.402718351	-10	-8	-9	0.0009	5	5	5	-0.0005		
624	0.477749527	-15	-9	-12	0.0012	8	5	6.5	-0.00065		
821	0.628577502	-19	-12	-15.5	0.00155	8	3	5.5	-0.00055		

Et pour les calculer, nous utilisons les valeurs se trouvant dans le tableau E.1.

Voici un exemple de calculs-types (Tableau E.1) pour l'essai de compression uniaxiale 3 (UN-3) des dix essais effectués.

Résultats :

Essai de compression uniaxiale avec mesure de déformations 3 (UN-3)

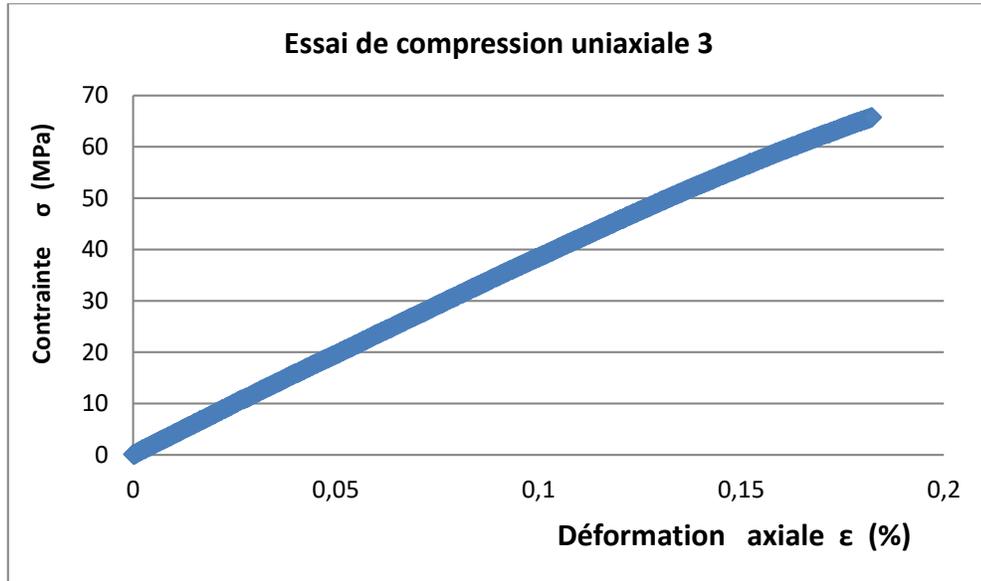


Figure E3: Contraintes axiales versus déformations axiales

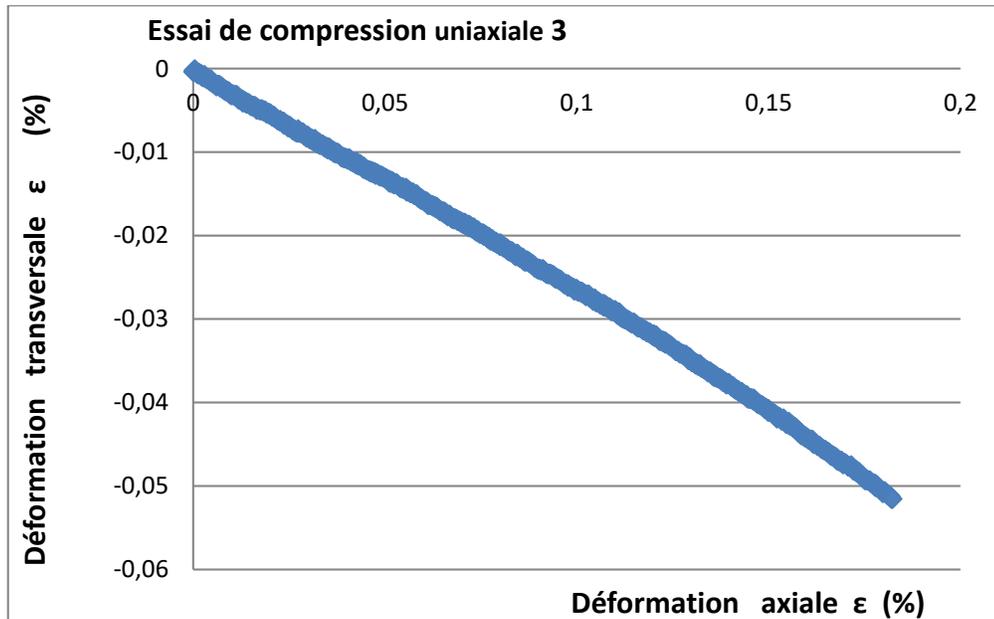


Figure E.4 : Déformations transversales versus déformations axiales

Voici le tableau récapitulatif des contraintes utilisées lors des séances d'expérimentation et les courbes de fluage sur des échantillons de roches basaltiques fracturés à la galerie Casséus de la mine Sedren au chaînage 0+335 W [m]. Voir Tableau E.2.

Tableau E.2 : Contraintes utilisées lors des séances d'expérimentation de fluage sur des échantillons de roches basaltiques fracturés à la galerie Casséus de la mine Sedren

Test ID		F1	F2	F3	F4
$\sigma_3$ (MPa)		0.1	2.0	4.0	6.0
$q = \sigma_1 - \sigma_3$	Étage 01	2.25	6.25	8.5	9.0
	Étage 02	6.5	10.0	12.25	13.0
	Étage 03	9.0	12.0	16.25	18.0

Par la suite, nous retrouvons des résultats de  $E_i$  et de  $\nu$  moyennant pour le Quartzite, le Basalte, le Granite et le Quartzite d'après le Tableau E.3 :

$$E_i = \frac{E_{basalt} + E_{granite} + E_{quartzite}}{n} = \frac{60 + 60 + 80}{3} = 67.0 \text{ GPa}$$

$$\nu_i = \frac{\nu_{basalt} + \nu_{granite} + \nu_{quartzite}}{n} = \frac{0.20 + 0.22 + 0.17}{3} = 0.20 \text{ GPa}$$

Nous retrouvons aussi la valeur de  $\sigma_{statique}$  moyennant pour le Basalte, le Granite, le Quartzite et le Porphyre d'après le Tableau E.3 :

$$\sigma_{statique} = \frac{\sigma_{basalte} + \sigma_{granite} + \sigma_{quartzite} + \sigma_{porphyre}}{n} = \frac{230 + 220 + 250 + 240}{4} = 235.0 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{statique} = 235.0 \text{ MPa}$$

Tableau E.3 : Contraintes de compression de différents types de massifs rocheux  
(Adapté de Stacey et al., 1986)

Type de roche	Contrainte résistance		Type de roche	Contrainte résistance	
	$\sigma_c$ [GPa]	$\sigma_c$ [psi]		$\sigma_c$ [GPa]	$\sigma_c$ [psi]
Amphibole	210	30 000	Marécage	30	4 300
Andésite	240	35 000	Norite	220	32 000
Anorthosite	240	35 000	<b>Porphyre</b>	<b>250</b>	<b>36 000</b>
<b>Basalte</b>	<b>230</b>	<b>33 000</b>	Pyroxenite	150	22 000
Craie	4	600	<b>Quartzite</b>	<b>240</b>	<b>35 000</b>
Chert	300	600	Massif de sel	40	6 000
Charbon	40	6 000	Sel	35	5 000
Diabase	240	35 000			
Dolerite	240	35 000	Massif de sable poreux	80	12 000
Dolomite	100	14 500	Massif de sable cristallisé	200	29 000
Gabbro	280	41 000	Massif de sable Hawkesbury	40	6 000
Gneiss	220	32 000			
<b>Granite</b>	<b>220</b>	<b>32 000</b>	Schiste	150	22 000
Greywacke	50	7 250	Grès	120	17 000
Gypse	20	300	Massif de silt	140	20 000
Hématite	270	39 000	Slate	210	30 000
Massif limoneux	180	26 000	Syenite	250	36 000
Magnétite	100	14 500	Tuff	200	29 000
Marbre	140	20 000			

Nous retrouvons aussi la valeur de  $\sigma_{ci}$  moyennant pour le Basalte, le Granite, le Quartzite et le Porphyre d'après le Tableau E.4 :

$$\sigma_{ci} = \sigma_{\text{statique}} + (\sigma_{\text{thermique}} + \sigma_{\text{tectonique}}) = 235 \text{ MPa} + 60 \text{ MPa} \quad \sigma_{ci} = = 295.0 \text{ MPa}$$

Tableau E.4 : Propriétés élastiques de différents types de massifs rocheux intacts  
(Adapté de Stacey et al., 1986)

Type de roche	Module d'élasticité $E_i$ [GPa]	Ratio de Poisson $\nu_i$
Andésite, Basalte	60	0.20
Diabase, Dolerite, Gabbro	90	0.20
Charbon	3	0.42
Argile de Londres	0.1	0.50
Diorite	80	0.26
Dolomite	70	0.15
Gneiss	60	0.24
Granite	60	0.22
Massif limoneux	70	0.30
Quartzite	80	0.17
Massif sablonneux	20	0.15
Grès	15	0.10

Classification du massif rocheux :

Le système de classification (RMR) de Bieniawski est présenté suivant le Tableau E.5. Pour vérifier la qualité, le mieux est d'adapter l'une ou plusieurs de ces approches géomécaniques élaborées: La méthode australienne (NATM) de Pacher et al., 1964; le Rock Mass Rating (RMR) de Bieniawski, 1973, 1989 - USA); le Rock Mass Quality (Q) de Barton et al, 1974, 2002 – Norway ; Geological Strength Index (GSI) Hoek and Brown, 1997, 2002 - Canada. La connaissance du comportement du massif rocheux est nécessaire à l'optimisation et à la sécurité d'un chantier. Le comportement du massif rocheux découle de la présence d'un réseau tridimensionnel de discontinuités dans celui-ci. La caractérisation géomécanique du massif rocheux permet de connaître les propriétés structurelles des discontinuités tel le pendage, la direction, l'espacement, la longueur trace, la rugosité, etc. Voir Tableau E.5.

Tableau E.5 : Paramètres de classification des roches (Biennawski, 1989)

<b>A. Paramètres de classification et leurs notes</b>					
Paramètres	Coefficients				
<b>A1. Résistance du matériau rocheux intact</b>					
Indice de résistance à la charge ponctuelle	> 10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa	Pour ce test de compression uniaxiale à plage basse, il est préférable
Résistance à la compression uniaxiale	> 250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	< 25 MPa
Évaluation $J_{A1}$	15	12	7	4	0 – 2
<b>A2. Qualité des carottes de forage – RQD</b>					
RQD	90 - 100%	75 - 90%	50 - 75%	25 - 50%	< 25%
Évaluation $J_{A2}$	20	17	13	8	3
<b>A3. Espacement des joints</b>					
	> 2 m	0.6 - 2 m	200-600 mm	60-200 mm	< 60 mm
Évaluation $J_{A3}$	20	15	10	8	5
<b>A4. Nature des joints</b>					
	-Surface très rugueuse -Discontinue -Roche murale non altérée	-Surface légèrement rugueuse -Séparation < 1 mm -Surfaces légèrement blanchies	-Surface légèrement rugueuse -Séparation < 1 mm -Surfaces fortement blanchies	-Surface lissée -Séparation 1-5 mm (Continue)	-Gorge doucede 5 mm d'épaisseur -Séparation > 5 mm (Continue)
Évaluation $J_{A4}$	30	25	20	10	0
<b>A5. Venues d'eau</b>					
Débit d'eau sur 10 m de longueur de tunnel (l / min)	0	< 10	10 – 25	25-125	> 125
Pression d'eau dans les joints –Contrainte principale (MPa)	0	< 0.1	0.1 – 0.2	0.2-05	> 0.5
Hydro-géologie	Complètement sec	Humide	Très humide	Égouté	En écoulement
Évaluation $J_{A5}$	15	10	7	7	0

## Calcul de la cote globale RMR, Q et GSI

Les systèmes de classification RMR, Q et GSI sont basés sur les mêmes propriétés du massif rocheux, mais le NATM est le seul qui est d'ordre qualitatif. De ces propriétés, certains paramètres utiles pour les gestionnaires et les ingénieurs miniers peuvent être calculés. Le « *Système de classification du massif rocheux* » utilise 6 paramètres (Tableau E.6) :

- a. La résistance en compression uniaxiale ( $\sigma_{ci}$ ) du massif rocheux à l'état intact
- b. La classification de Barton ou le calcul de la cote de Qualité du massif (Q).
- c. L'espace des discontinuités.
- d. Les conditions des discontinuités (rugosité).
- e. Les conditions de l'effet d'eau dans le massif rocheux;
- f. L'ajustement d'orientation des discontinuités.
- g. Paramètres de l'excavation

Diamètre de l'excavation : 2.5 m (Adit Terre Neuve)

Excavation Support Ratio : 1.3 (Adit Terre Neuve)

Tableau E.6 : Paramètres liés au massif rocheux de Sedren

PARAMÈTRES	Contribution à la cote globale
Résistance en compression uniaxiale de la roche intacte (altération des discontinuités) :	$J_{A1} = 12.0$
Cote RQD (classification de Deere) :	$J_{A2} = 60.0$
Espace des discontinuités (nbre de familles)	$J_{A3} = J_n = 2.0$
Conditions des discontinuités (rugosité) :	$J_{A4} = J_r = 4.0$
Conditions d'eau (effet de l'eau) Ajustement d'orientation de joints	$J_{A5} = J_w = 1.0$ $J_o = -1.0$
RMR = Cote globale ( $\Sigma (J_{A1} \text{ à } J_{A5})$ )	RMR = 80.0

Le RQD, Deere et al. (1967), est l'un des paramètres les plus connus et utilisés en génie minier et peut être mesuré sur une carotte de forage ou une traverse le long d'une paroi rocheuse. L'identification de la trace des discontinuités est absolument nécessaire au calcul du RQD.

#### Résultats de calcul

##### Qualité de la roche

coefficient Q : 53.333

Qualité de la roche : [Très bonne](#)

##### Mode de soutènement

Dimension équivalente : 1.9230769230769

Type de soutènement : résultat [Figure E.11](#)

##### Efforts dans le soutènement

Au niveau de la voûte : 0.031MPa

Au niveau de la paroi : 0.018MPa

Module de Young du massif : 59578.107 MPa = 60 GPa

Où (moyennant pour le Basalte et Granite) :  $RQD^{70} = 60$  (Qualité bonne)

---

<sup>70</sup> La cote de qualité (RQD) de Barton est importante pour des excavations souterraines. Elle a besoin d'un paramètre appelé Dimension équivalente de l'excavation. Cette dimension s'obtient en divisant le Span (diamètre ou hauteur du parement) par une quantité appelée ratio du support d'excavation, ESR.

ÉTAPE 05 : Estimation des corrélations paramétrées du massif rocheux (Q, RMR,GSI)

Les Figures E.5 à E.8 établissent des relations entre E, Q, RMR et GSI des massifs rocheux. C'est ainsi qu'on peut déjà grossièrement avoir une idée de la qualité du massif.

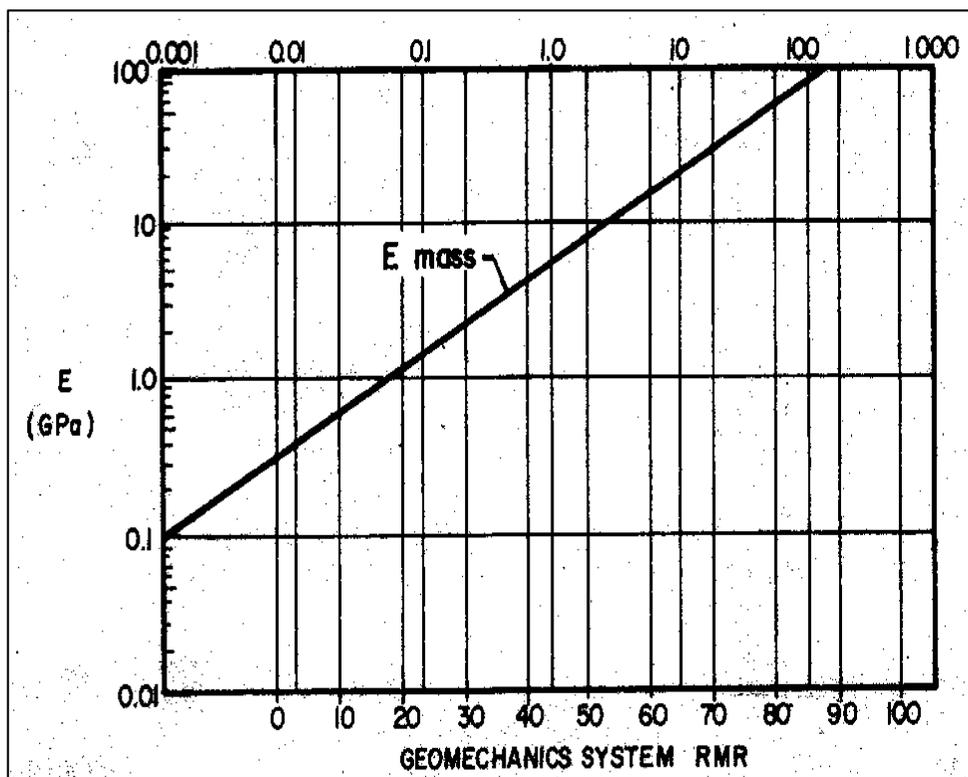


Figure E.5 : Relation entre le RMR et E des massifs rocheux (Stacey et al., 1986)

Si  $E$  (moyennant Basalte et Granite) : = 70 GPa

⇒ RMR (moyennant Basalte et Granite) : = 80.0

Le code "Roclab" a été développé (Hoek et al., 2002) pour évaluer les paramètres de résistance du massif rocheux (cohésion, angle de friction interne) en utilisant le GSI.

Tableau E.7 : Corrélation entre les systèmes de classification de massif rocheux  
Script Roclab utilisant le GSI

Pick GSI Value		SURFACE CONDITIONS				
Rock Type: <input type="text" value="General"/>		VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR
GSI Selection: <input type="text" value="60"/> <input type="button" value="OK"/>		DECREASING SURFACE QUALITY →				
STRUCTURE		DECREASING INTERLOCKING OF ROCK PIECES ↓				
	INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90	80		N/A	N/A
	BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets		70			
	VERY BLOCKY- interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets			50		
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity			40		
	DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces				30	
	LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes					20
						10
		N/A	N/A			

Pour calculer le GSI « **Geological Strength Index** », on utilise le RMR non ajusté qu'on a calculé ci-haut. Nous fixons d'abord la valeur du paramètre JA5 à 15, on obtient le  $RMR'_{89} = 75$  ; cette valeur étant supérieure à 23 on calcule alors le GSI avec la formule suivante :  $GSI = RMR'_{89} - 5 = 70$ . Voir Tableau E.6.

Les systèmes de classification RMR, Q et GSI se corrént voire jusqu'à avoir plusieurs relations por dresser une table où l'on peut tirer un indice de résistance géologique (GSI).

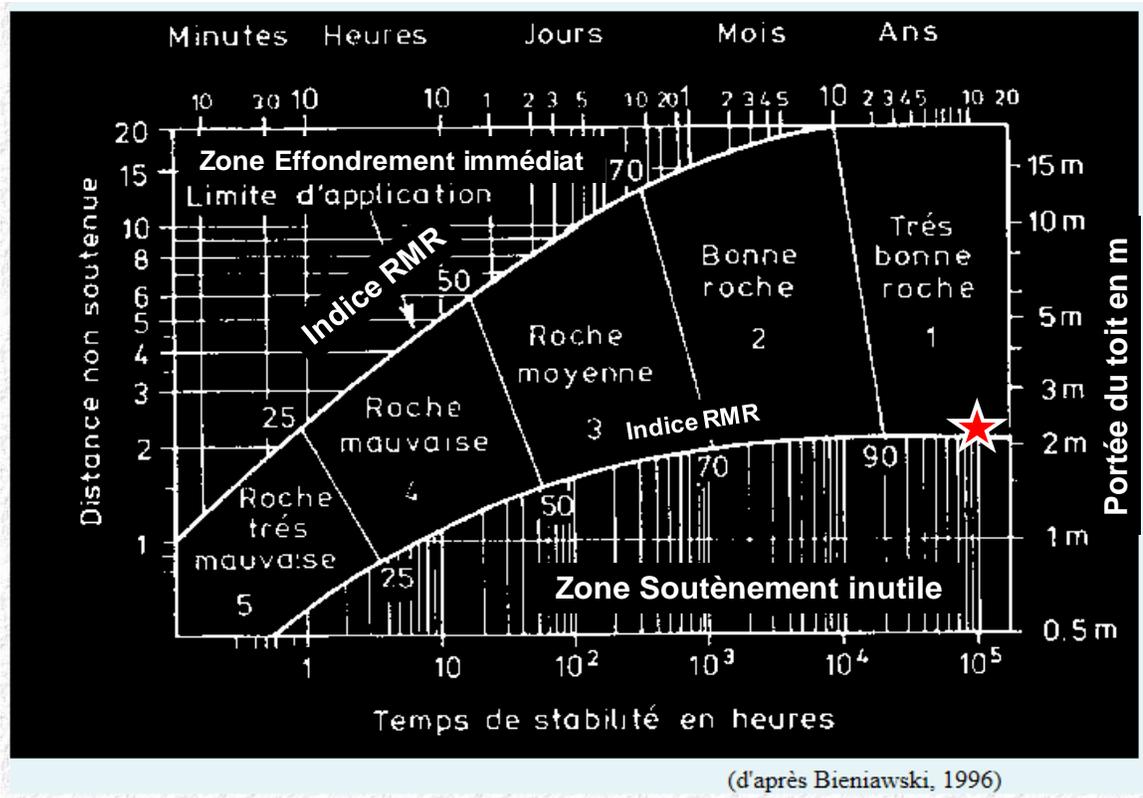


Figure E.6 : Corrélation entre la portée du toit [m] et la durée de vie d'une galerie versus la classe du massif rocheux

Où (moyennant pour le Basalte et pour le Granite d'après la Figure E.7) :

Si  $RMR = 80$  alors  $Durée = [0.5 \times 10^3, 10^4]$  heures ou  $[1/4]$  ans environ

$RMR \approx 9 \ln Q + 44$ (Bieniawski, 1989)	$Q \gg e^{\frac{(RMR-44)}{9}}$	1
$RMR \approx 15 \log Q + 50$ (Barton, 1995)	$Q \gg 10^{\frac{(RMR-50)}{15}}$	2

1	RMR = -18.2	2.6	23.3	44	56.5	64.7	77.2	85.4	97.9	106.2					
2	RMR = 5	V	20	IV	35	50	III	59	65	II	74	80	89	I	95
		G	F	E	D	C	B	A							

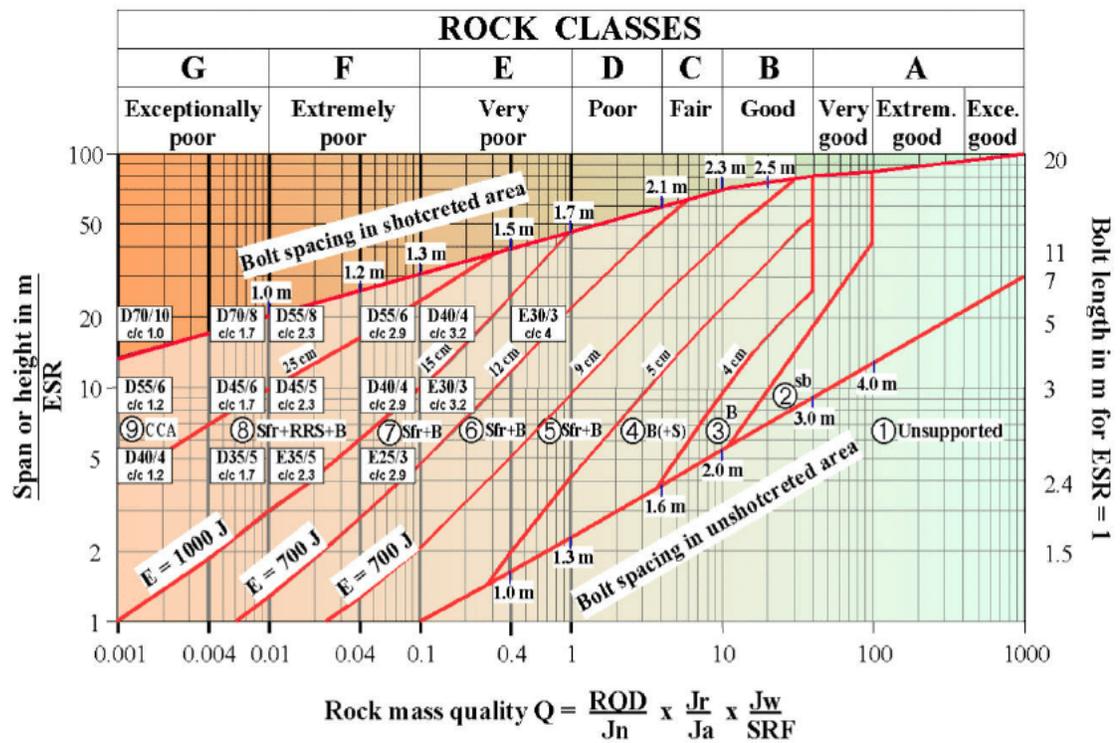


Figure E.7 : Qualité de la roche (Adapté de Bieniawski, 1989 et Barton, 1995)

- (1) non-supporté
- (2) Boulonné à des points précis
- (3) Boulonné de façon systématique
- (4) Boulonné de façon systématique avec un intervalle de 40 à 100 mm non renforcé par du béton
- (5) Boulonné de façon systématique avec un intervalle de 50 à 90 mm renforcé de fibres dans du béton
- (6) Boulonné de façon systématique avec un intervalle de 90 à 120 mm renforcé de fibres dans du béton
- (7) Boulonné de façon systématique avec un intervalle de 120 à 150 mm renforcé de fibres dans du béton
- (8) Boulonné de façon systématique avec un intervalle de 150 mm et plus renforcé de fibres dans du béton
- (9) Enrobage en béton

La Figure E.8 donne est le modèle de corrélation idéale pour l'évaluation de l'indice recherché.

Où (moyennant pour le Basalte et pour le Granite) :  $Q = 53.333$  (Qualité : Très bonne)

$$RMR = 9 \ln(Q) + 44 = 79.79 = 80 \quad (\text{d'après Bienniaowski, 1989})$$

$$RMR = 15 \log(Q) + 50 = 75.40 = 75 \quad (\text{d'après Barton, 1995})$$

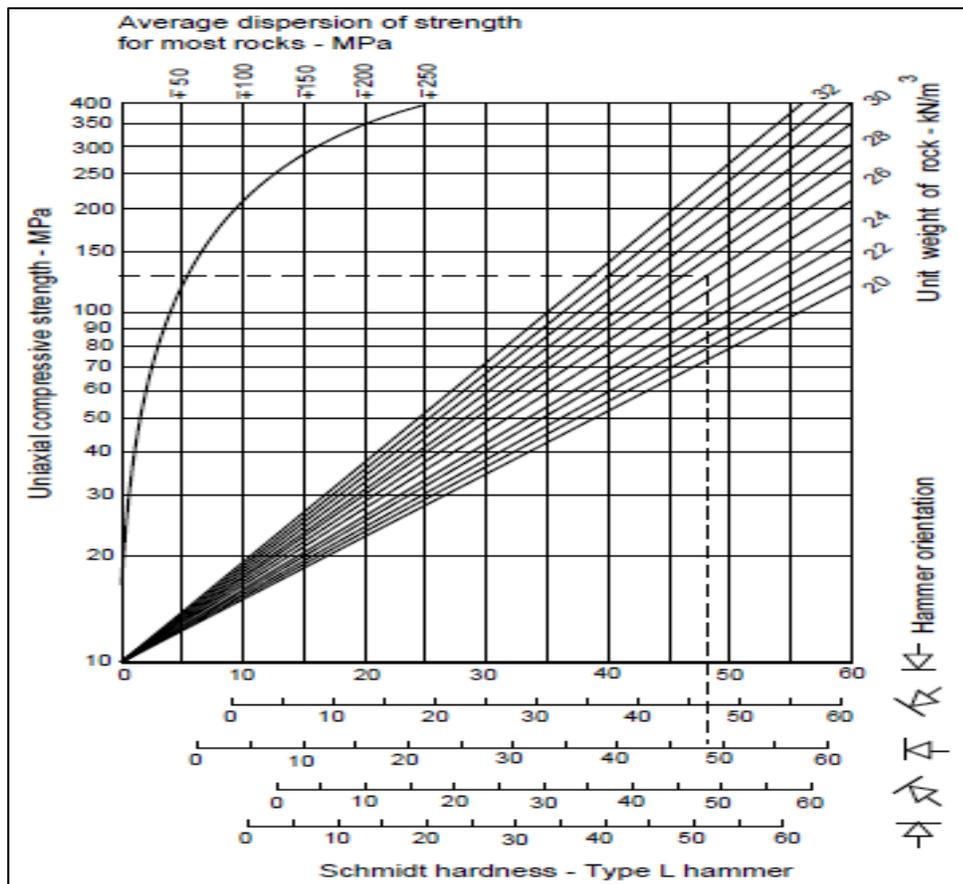


Figure E.8 : Corrélation entre l'indice Schmidt et la contrainte de compression ( $\sigma_c$ )  
(Adapté de Stacey et al., 1986)

Autant que la Figure E.8 ferme la boucle pour trouver l'indice Schmidt de dureté.

Où (moyennant pour le Basalte et Granite) :

$$(\sigma_c) = 225.0 \text{ MPa} \Rightarrow \rho = 26.0 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} \Rightarrow I_{\text{Schmidt}} = 55 \text{ coups de marteau}$$

ÉTAPE 06 : Analyse de modèles de critères de design structural choisis

Deux théories ont été retenues pour l'analyse de stabilité : Les théories de Mohr-Coulomb modifiée et de Hoek-Brown.

a. La théorie de HOEK-BROWN (Figure E.9)

Le critère de rupture de Hoek-Brown s'exprime pour une roche isotrope par :

$$\sigma_1 = \sigma_3 + [(mC_0 \sigma_3) + s \sigma_0^2]^{1/2} \quad \text{lorsque } \sigma_1 > 3,4 \sigma_3$$

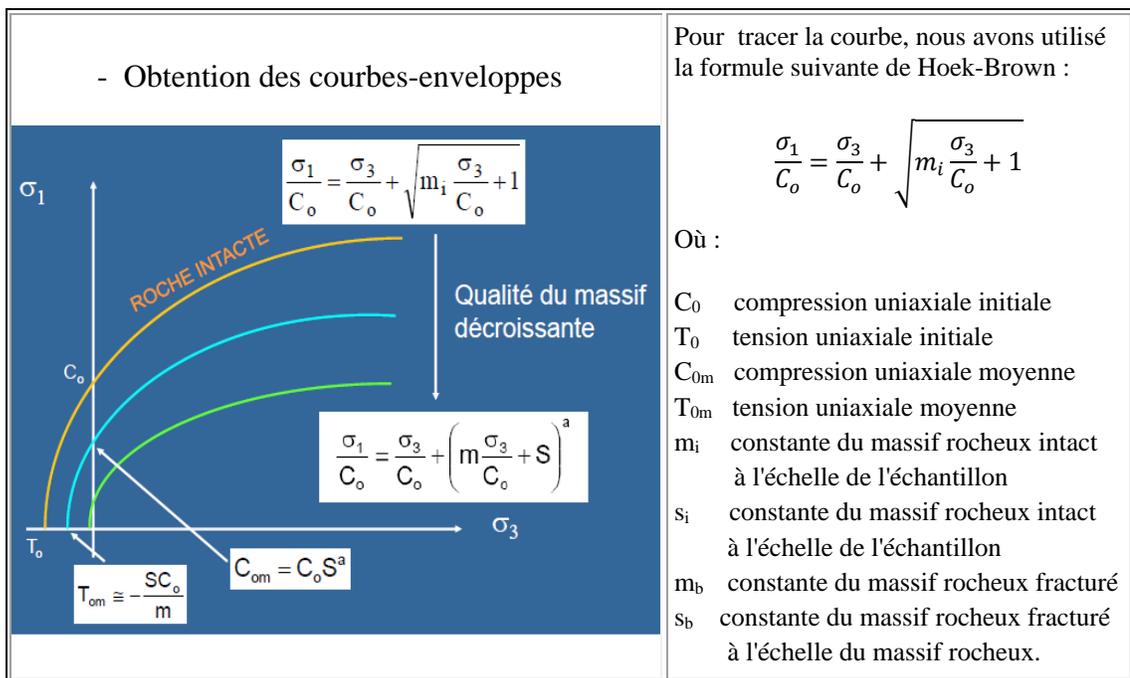


Figure E.9 : Courbe enveloppe de design structural d'un massif rocheux – Influence de la qualité du massif rocheux (D'après Hoek-Brown et al., 1986)

Tableau E.8 : Classification de la qualité d'un massif rocheux de types 5 & 6 basée suivant les constantes m et s (Hoek-Brown, 1988)

CRITÈRE DE RUPTURE DE HOEK-BROWN $\sigma_1 = \sigma_3 + [(mC_0\sigma_3) + s\sigma_0^2]^{1/2}$ Posons RMR = 9 ln Q + 44	Cte	Description des roches				
		Roches carbonatées avec dolomite, calcaire et marbre à clivage cristallin bien développés	Roches argileuses lithifiées mudstone, siltstone, schiste et ardoise (normal au clivage)	Roches arénageuses avec cristaux forts et grès et quartzite à clivage cristallin peu développés	Roches cristallines ignées polyminéraliques à grains fins amandésite, dolorite, diabase et rhyolite	Roches cristallines ignées et métamorphiques polyminéraliques à gros grains amphibolite, gabbro, gneiss, granite norite, etc.
Échantillons de roches intactes RMR = 100 ; Q = 500	m'	7.00	10.00	15.00	17.00	25.00
	s'	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	m	7.00	10.00	15.00	17.00	25.00
	s	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Masse rocheuse de très bonne qualité RMR = 85 ; Q = 100	m'	2.40	3.43	5.14	5.82	8.56
	s'	0.082	0.082	0.082	0.082	0.082
	m	4.10	5.85	8.78	9.95	14.63
	s	0.189	0.189	0.189	0.189	0.189
Masse rocheuse de bonne qualité RMR = 65 ; Q = 10	m'	0.575	0.821	1.231	1.395	2.052
	s'	0.00293	0.00293	0.00293	0.00293	0.00293
	m	2.006	2.865	4.298	4.871	7.163
	s	0.0205	0.0205	0.0205	0.0205	0.0205
Masse rocheuse de qualité médiocre RMR = 44 ; Q = 1	m'	0.128	0.183	0.275	0.311	0.458
	s'	0.9 E-04	0.9 E-04	0.9 E-04	0.9 E-04	0.9 E-04
	m	0.947	1.353	2.030	2.301	3.383
	s	0.00198	0.00198	0.00198	0.00198	0.00198
Masse rocheuse de mauvaise qualité RMR = 23 ; Q = 0.1	m'	0.029	0.041	0.061	0.069	0.102
	s'	0.3 E-05	0.3 E-05	0.3 E-05	0.3 E-05	0.3 E-05
	m	0.447	0.639	0.959	1.087	1.598
	s	0.00019	0.00019	0.00019	0.00019	0.00019
Masse rocheuse de très mauvaise qualité RMR = 3 ; Q = 0.01	m'	0.007	0.010	0.15	0.17	0.025
	s'	0.1 E-06	0.1 E-06	0.1 E-06	0.1 E-06	0.1 E-06
	M	0.219	0.313	0.469	0.532	0.0782
	S	0.2 E-04	0.2 E-04	0.2 E-04	0.2 E-04	0.2 E-04

- Tracer la courbe du critère Hoek - Brown (rouge) pour le massif rocheux  
Voir Figure E.10.

$$m_b = m_i * \exp((GSI - 100)/(28 - 14D)) = 0.925$$

$$S = \exp((GSI - 100)/(9 - 3D)) = 0,0023$$

$$a = 0,5 + 1/6(e - GSI/15 - e - 20/3) = 0,503$$

$$\text{Équation de la courbe : } \sigma_1 = \sigma_3 + [ (m \sigma_0 \sigma_3) + s \sigma_0 ]^{1/2}$$

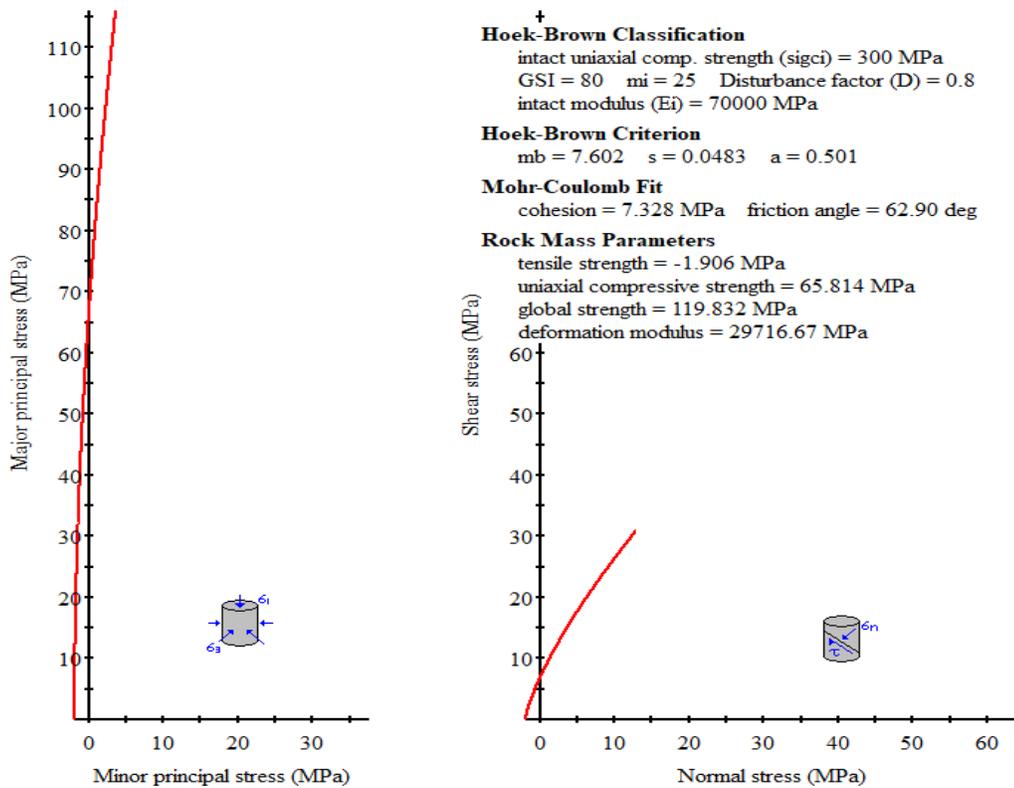


Figure E.10 : Analyse de résistance des massifs rocheux Mémé-Casséus  
(D'après Hoek-Brown, 1986)

Nous avons calculé le paramètre  $m_i$  à l'aide de l'approximation suivante moyennant les valeurs du **granodiorite**, du basalte et du **quartzite** tirées des Tableaux E.9 et E.10.

Tableau E.9 : Valeurs de  $m_i$  suggérés par Hoek et Brown (1980)

Type de roche	$m_i$
Dolomite, calcaire, marbre	$9 \pm 3$
Mudstone	$10 \pm 5$
Siltstone	$7 \pm 2$
Shale	$6 \pm 2$
Ardoise	$7 \pm 4$
Grès	$17 \pm 4$
<b>Quartzite</b>	<b><math>20 \pm 3</math></b>
Andésite	$25 \pm 5$
Dolorite	$16 \pm 5$
Diabase	$15 \pm 5$
Rhyolite	$25 \pm 5$
Amphibolite	$26 \pm 6$
Gabbro	$27 \pm 3$
Gneiss	$28 \pm 5$
<b>Granite</b>	<b><math>32 \pm 3</math></b>
Norite	$20 \pm 5$
<b>Graniorite</b>	<b><math>25 \pm 5</math></b>

$$m_i = \frac{m_{\text{Granodiorite}} + m_{\text{Granite}} + m_{\text{Quartzite}}}{n} = \frac{25 + 32 + 20}{3}$$

$$m_i = 25.0$$

Tableau E.10 : Guide de sélection du Module  $M_R$   
(Deere, 1968 et Singh, 2001)

	CLASSE Clastique	GROUPE	TEXTURE			
			Corsé	Médium	Fine	Très fine
ROCHES SÉDIMENTAIRES	Clastique		Conglomérat 300-400 Brèches 230-350	Massif de sable 200-350	Massif de silt 350-400	Massif argileux 200-300 Grès 150-250 <sup>+</sup>
	Non clastique	Carbonates	Chrystaline Massif limon 400-600	Sparitic Massif limon 600-800	Micritic Massif limon 800-1000	Dolomites 350-500
		Évaporites		Gypse 350	Anhydrite 350	
		Organiques				Craie 1000-
ROCHES MÉTAMORPHIQUES	Présence de foliations		Marbre 700-1000	Gros massif de sable 200-300	Quartzite 300-450	
	Quelques foliations		Migmatites 350-400	Amphibolite 400-500	Gneiss 300-750	
	Pas de foliation			Schistes 250-1100	Phylites / Mica Schistes 300-800	Slates 400-600*
ROCHES IGNÉES	Plutonique	Claire	Granite+ 300-550	Diorite+ 300-350		
		Granodiorite 400-450				
		Noire	Gabbro+ 400-500	Dolorites 300-400		
			Norite 350-400			
	Hyperabyssal		Porphyres 400		Diabase 300-350	Péridotite 250-300
	Volcanique	Lavaire		Rhyolite 300-500 Andésite 300-500	Dacite 350-450 Basalte 250-450	
Pyroclastique		Agglomérat 400-600	Brèches 500	Tuffs 200-400		

Validation des résultats :  $M_R = [300, 550]$  ;  $M_R = 425$  (Granite) ssi  $m_i = 25$ .

- Déterminer la résistance en compression uniaxiale moyenne du massif de la zone élastique.

Données trouvées précédemment :

$$C_0 = 230 \text{ MPa} \quad m_b = 0.925 \quad S = 0.0094 \quad a = 0.503$$

Équations et résultats :

$$C_{om} = C_0 * S^a = 30.145 \text{ MPa}$$

$$T_{om} \cong - (S * C_0) / m_b = - 0.580 \text{ MPa}$$

- Déterminer le module de Young moyen pour le massif de la zone élastique.

Hypothèse : La méthode d'excavation ne provoquera pas de remaniement dans le massif. Donc, le paramètre D utilisé plus loin sera de 0.

De plus,  $C_0 = 230 \text{ MPa}$  et  $GSI = 60$ .

$$E_m = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \sqrt{\frac{C_0}{100}} * 10^{\left(\frac{GSI-10}{40}\right)} = 10\,252 \text{ MPa} \cong 10 \text{ GPa}$$

Il est à noter que cette méthode a été utilisée puisque  $E_m = 25 \log Q$  était trop imprécise vu la grande possibilité que peut prendre SRF lors du calcul de Q.

b. La théorie de Mohr-Coulomb modifiée (D'après Montès, 2012 et 2013)

La théorie de Mohr (Figure E.15) suppose que pour un état de contraintes

$\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ , la contrainte intermédiaire n'intervient pas dans la rupture.

Le critère de Mohr s'exprime par une relation de la forme  $\tau = f(\sigma)$  :

$$\text{Où } |\tau| = c + \mu \sigma = c + \text{tg}(\phi) \sigma$$

$\tau$  : contrainte de cisaillement du matériau

$c$  : cohésion;

$\mu$  : coefficient de frottement [  $\mu = \text{tg}(\phi)$  ]

$\phi$  : angle de frottement.

La courbe ou enveloppe de Mohr Coulomb est obtenue expérimentalement en traçant l'enveloppe de plusieurs cercles de rupture relatifs à différents chemins de sollicitations. Elle est approximée par une droite. Voir Figure E.14.

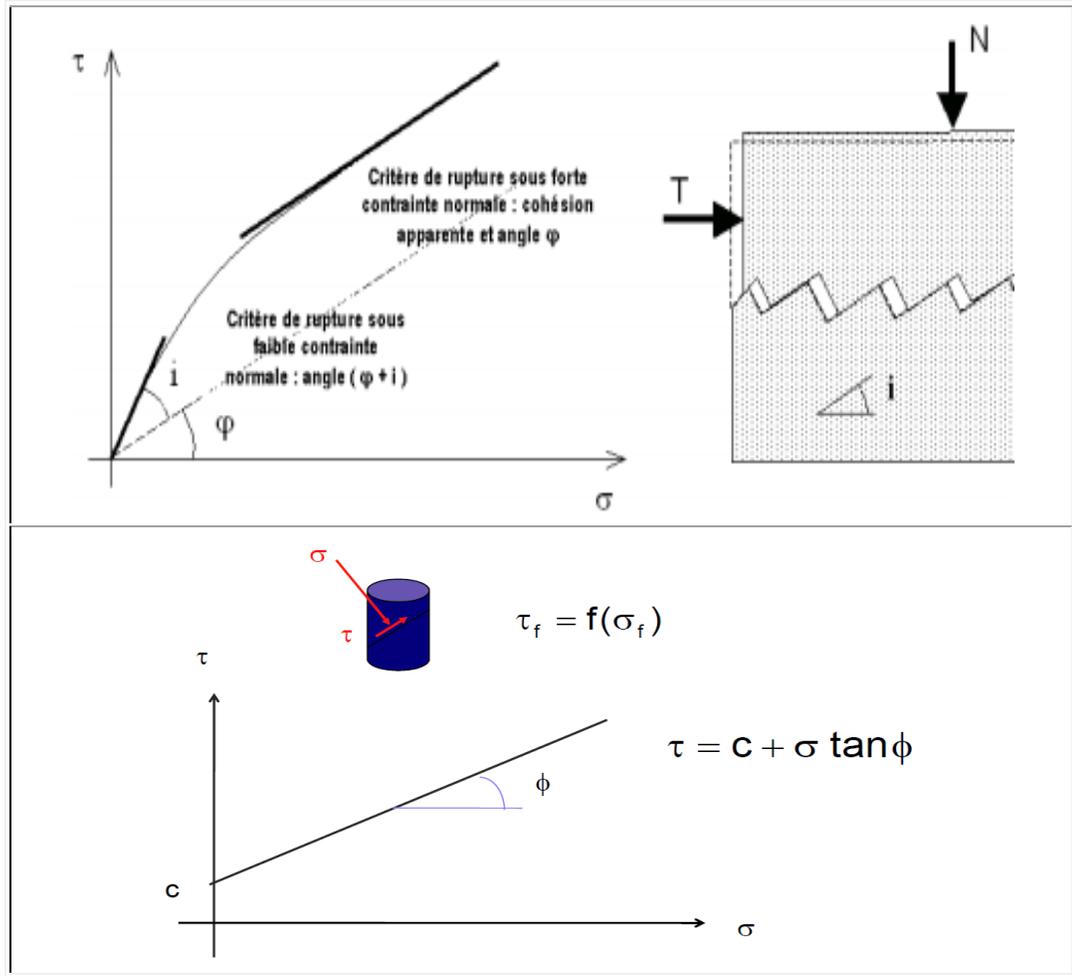


Figure E.11 : Courbe-enveloppe de le plan Mohr Coulomb

En mécanique, les paramètres  $S_{ut}$  (résistance en traction uniaxiale) et  $S_{uc}$  (résistance en compression uniaxiale) sont employés pour exprimer le critère de rupture de

Coulomb sous la forme :

$$\frac{\sigma_{max}}{S_{ut}} + \frac{\sigma_{min}}{S_{uc}} = 1$$

$$\sigma_{max} = \text{Max} (\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$$

$$\sigma_{min} = \text{Min} (\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$$

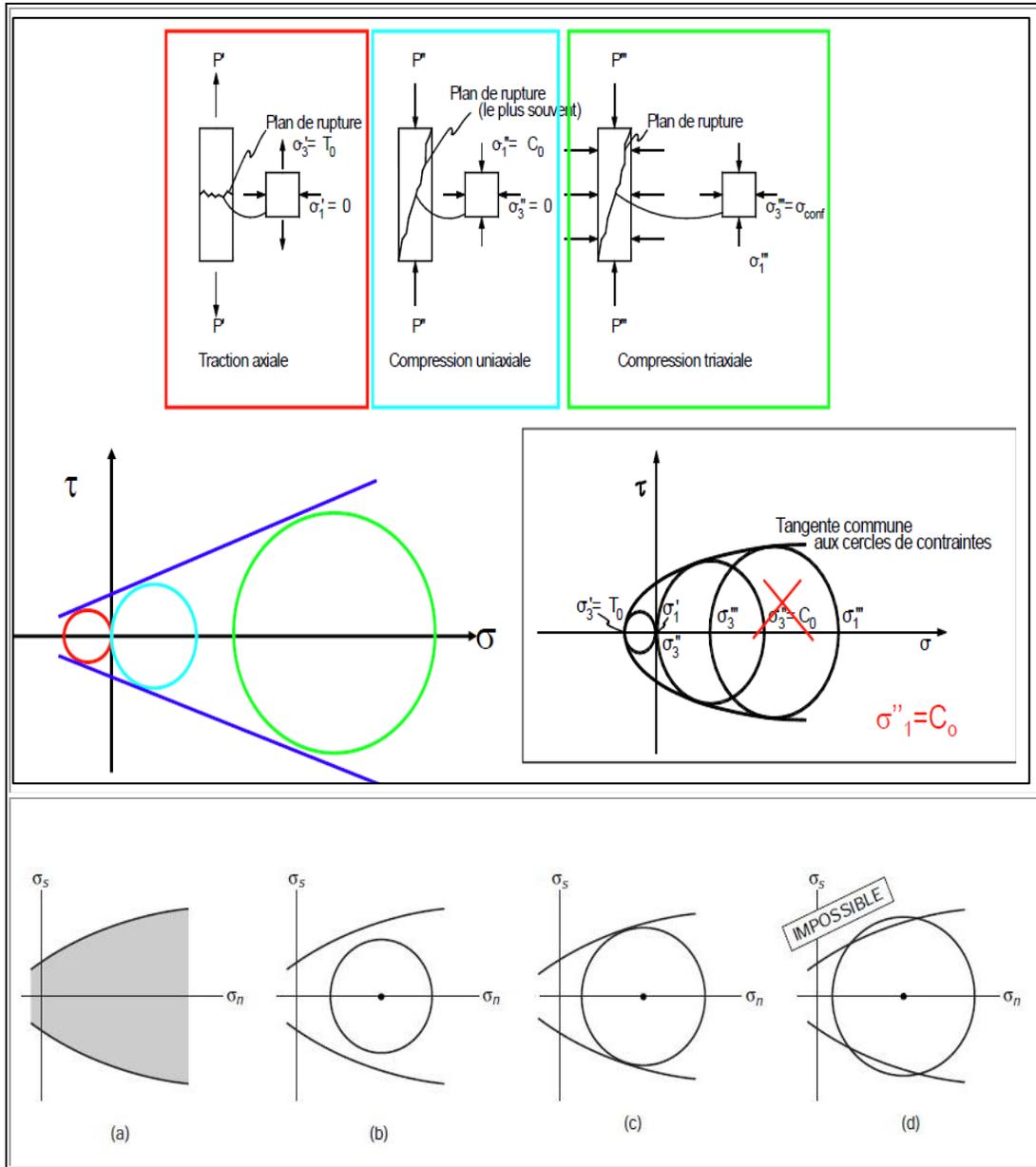


Figure E.12 : Obtention des Courbes-enveloppes (a) Frontières du domaine (b) Cercle de Mohr n'atteignant les frontières. (c) Cercle de Mohr n'atteignant les frontières. (d) Cercle de Mohr dépassant les frontières.

La Figure E.15 montre comment obtenir l'enveloppe de Coulomb, les cercles de Mohr associés aux essais de traction et de compression uniaxiaux.

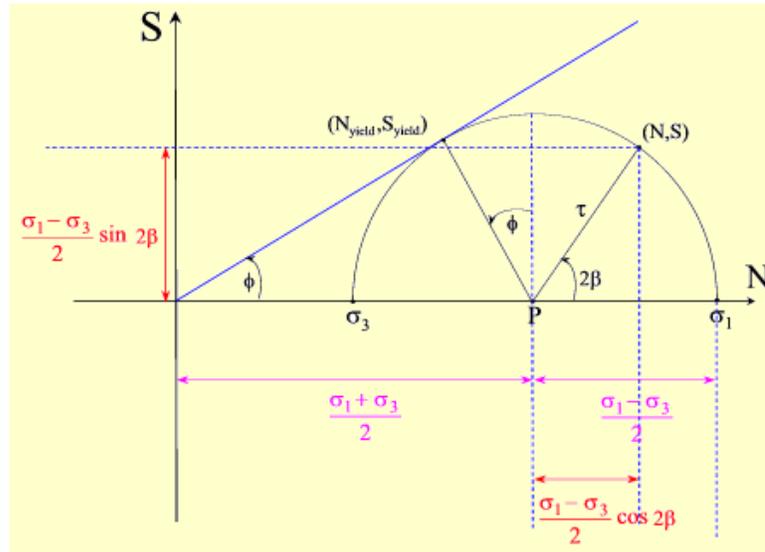


Figure E.13 : Enveloppe de Coulomb – Cercle de Mohr en un point de la rupture

On en déduit les relations suivantes :

$$S_{ut} = \left( \frac{2c \cos \phi}{1 + \sin \phi} \right) ; S_{uc} = \left( \frac{2c \cos \phi}{1 - \sin \phi} \right) \text{ où } \sin \phi = - \left( \frac{S_{ut} + S_{uc}}{S_{ut} - S_{uc}} \right)$$

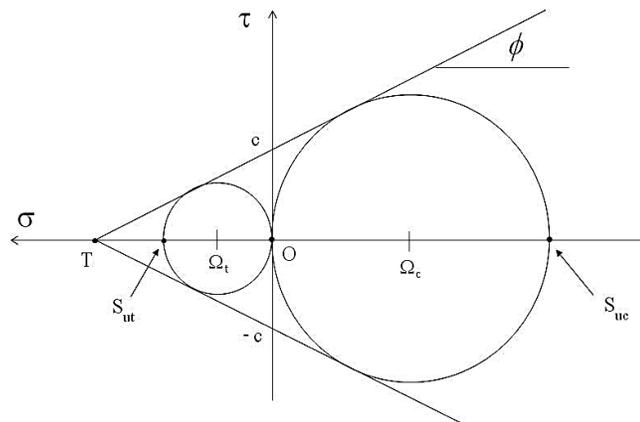


Figure E.14 : Enveloppe de Coulomb – Cercle de Mohr à la rupture en compression et traction (bétons et roches)

$$F. S. = \frac{\text{Résistance mobilisable}}{\text{État de contrainte}}$$

Si la résistance du sol est supérieure aux contraintes en tous les points où elles sont susceptibles de devenir critiques, on aura stabilité immédiate après le percement; si la résistance du sol est inférieure aux contraintes en un des points où elles sont susceptibles de devenir critiques, on doit admettre qu'on aura instabilité simultanément au percement.

Si  $\sigma_1 = 0, \sigma_3 < 0$  ;  $\sigma_1 > 0, \sigma_3 < 0$  ;  $\sigma_1 > 0, \sigma_3 = 0$

Respectivement :

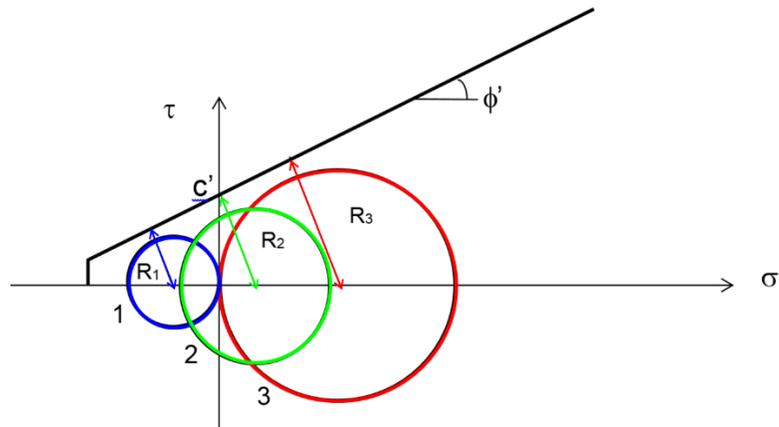


Figure E.15 : Essai tri-axial – Cercle de Mohr à la rupture en compression et traction (bétons et roches)

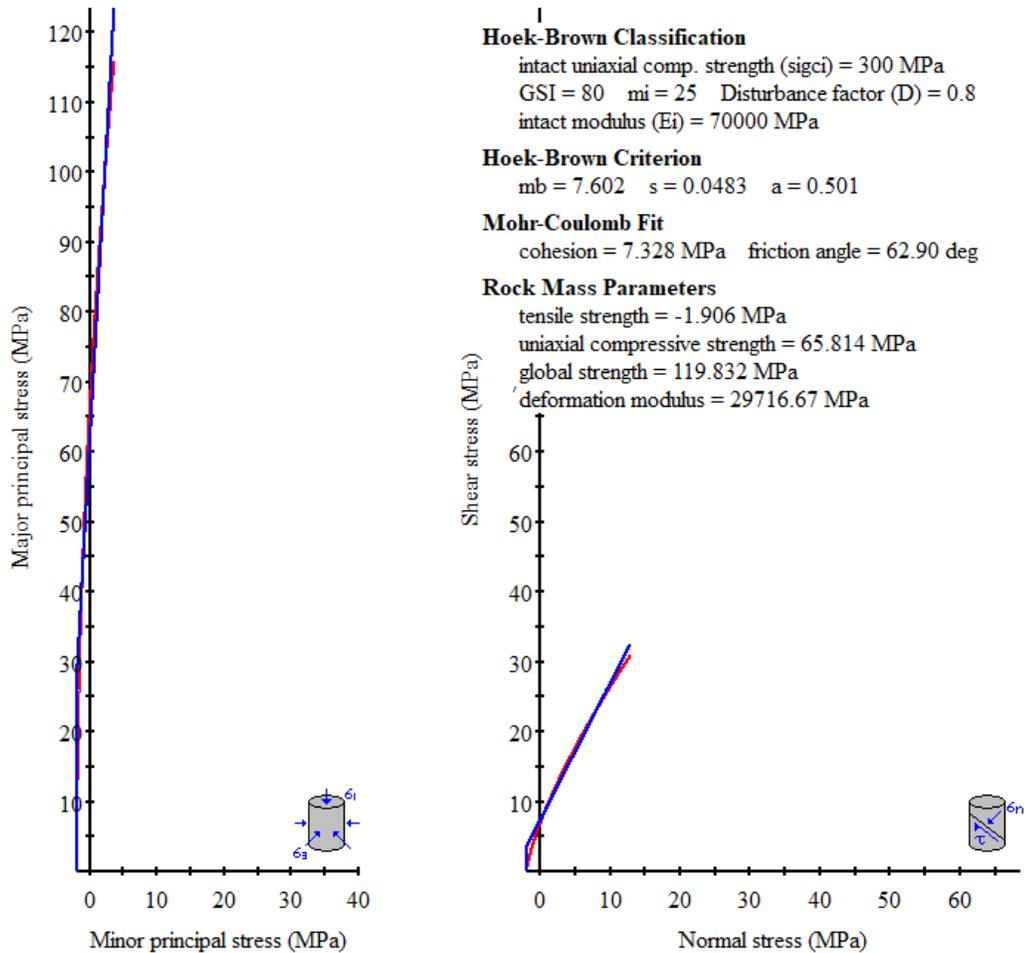
$$F. S._1 = \frac{\sigma_3 \sin \phi' + 2 c' \cos \phi'}{-\sigma_3}$$

$$F. S._3 = \frac{\sigma_1 \sin \phi' + 2 c' \cos \phi'}{\sigma_1}$$

$$F. S._2 = \frac{(\sigma_1 + \sigma_3) \sin \phi' + 2 c' \cos \phi'}{(\sigma_1 - \sigma_3)}$$

- Tracer la courbe de Mohr-Coulomb (en bleu) pour le massif rocheux

Équation de la courbe :  $|\tau| = c + \mu \sigma = c + \text{tg}(\phi) \sigma$



(Scripts RocLab 2019)

Figure E.16 : Courbes enveloppes de design structural des massifs Mémé-Casséus

Courbe en rouge / Hoek-Brown & Droite en bleu / Mohr-Coulomb modifié

Où (moyennant pour le Basalt et le Granite d'une Profondeur de tunnel = 250 m)

$\phi = 65.814$  degrés ;  $c = 7.328$  MPa; GSI = 80 (valeurs de RocLab)

- Calcul du facteur de sécurité local avec Mohr-Coulomb dans le plan octaédrique (compression positive)

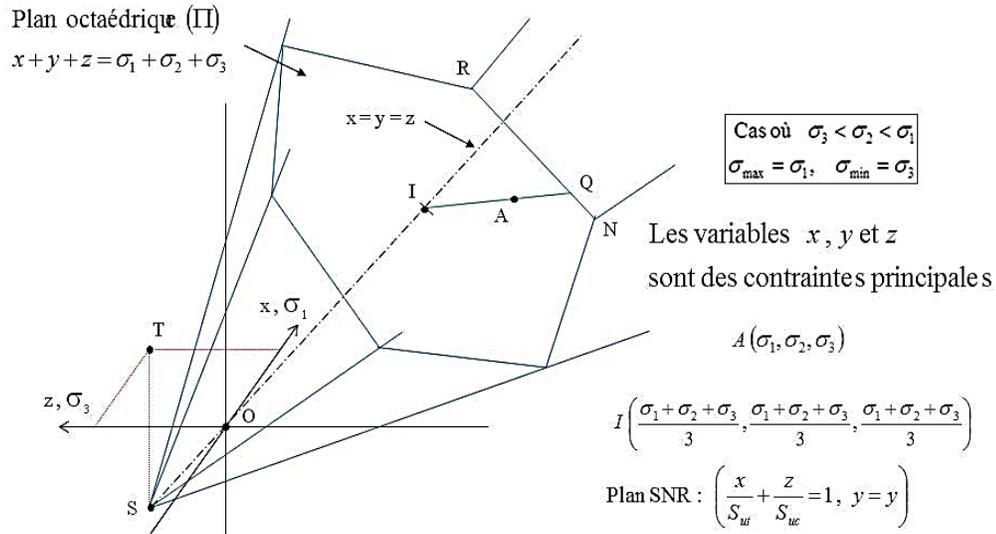


Figure E.17 : Polyèdre de Coulomb dans l'espace des contraintes principales, facteur de sécurité dans le plan octaédrique (II). (D'après Montès, 2012)

$$F.S._{II} = \frac{IQ}{IA}$$

Théorème : Sachant que  $\sigma_3 < \sigma_2 < \sigma_1$  les facteurs de sécurité  $FS_{PM}$  et  $FS_{II}$  sont liés par les relations équivalentes :

$$F.S._{II} = \frac{F.S._{PM} - (2/3)\left(\frac{(\sigma_1 + \sigma_3)}{2} - \sigma_2\right)[S_{ut} + S_{uc}]}{\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)[S_{ut} - S_{uc}]}{1 - \frac{(2/3)\left(\frac{(\sigma_1 + \sigma_3)}{2} - \sigma_2\right)[S_{ut} + S_{uc}]}{(\sigma_1 - \sigma_3)[S_{ut} - S_{uc}]}}}$$

$$F.S._{II} = \frac{F.S._{PM} + (2/3)\left(\frac{(\sigma_1 + \sigma_3)}{2} - \sigma_2\right)[\sin\phi]}{\frac{(\sigma_1 - \sigma_3)[S_{ut} - S_{uc}]}{1 + \frac{(2/3)\left(\frac{(\sigma_1 + \sigma_3)}{2} - \sigma_2\right)[\sin\phi]}{(\sigma_1 - \sigma_3)[S_{ut} - S_{uc}]}}}$$

Où :  $S_{ut}$  : contrainte de rupture en traction ;  
 $S_{uc}$  : contrainte de rupture en compression .

(D'après Montès, 2012)

- Critère de Mohr en fonction de  $I_1$ ,  $J_{2D}$  et  $\alpha_0$  (compression positive)

Voici les équations des contraintes principales (non classées) sont :

$$\sigma_1 = \frac{1}{3} I_1 + \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{J_{2D}} \sin \alpha_0$$

$$\sigma_2 = \frac{1}{3} I_1 + \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{J_{2D}} \sin(\alpha_0 - \frac{2\pi}{3})$$

$$\sigma_3 = \frac{1}{3} I_1 + \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{J_{2D}} \sin(\alpha_0 + \frac{2\pi}{3})$$

- Expression du facteur de sécurité (compression positive)

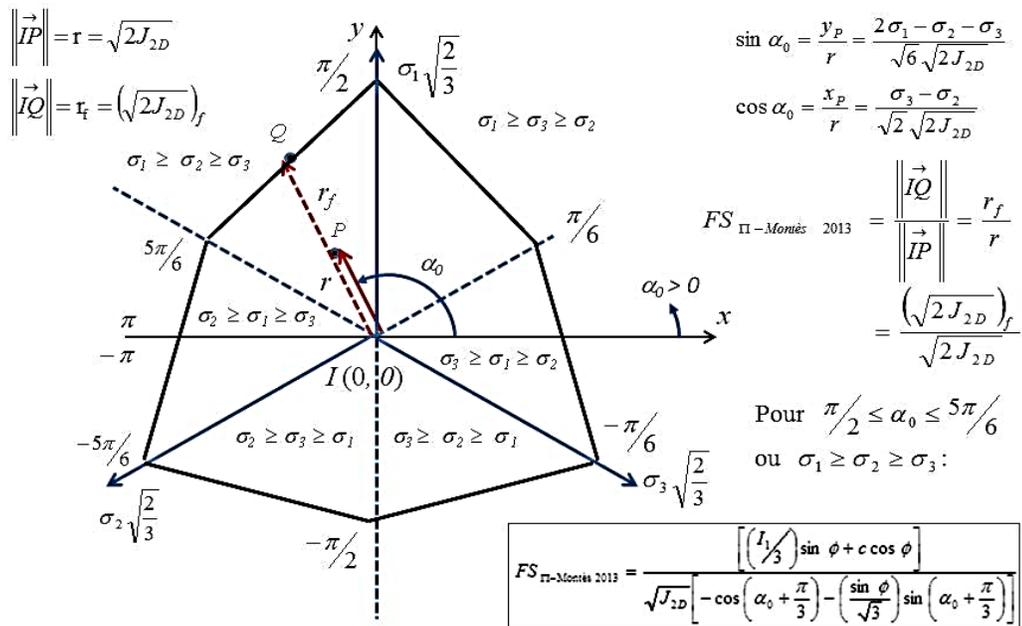


Figure E.18 : Facteur de sécurité dans le plan octaédrique - Compression positive, invariants  $I_1$ ,  $J_{2D}$  et  $\alpha_0$ . (D'après Montès, 2013)

$$F.S._{\Pi} = \frac{[(I_1/3) \sin \phi + c \cos \phi]}{\sqrt{J_{2D}} [-\cos(\alpha_0 + \pi/3) - (\frac{\sin \phi}{\sqrt{3}}) \sin(\alpha_0 + \pi/3)]}$$

(D'après Montès, 2013)

Voici les équations du facteur de sécurité dans chacun des six secteurs du plan octaédrique en fonction de l'angle  $\alpha_0$  :

1. $(\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3) \Rightarrow \frac{\pi}{2} \leq \alpha_0 \leq \frac{5\pi}{6}$	et $FS_{\pi} = \frac{\left(\frac{I_1}{3}\right) \sin \phi + c \cos \phi}{\sqrt{J_{2D}} \left[ -\cos \left( \alpha_0 + \frac{\pi}{3} \right) - \frac{\sin \phi}{\sqrt{3}} \sin \left( \alpha_0 + \frac{\pi}{3} \right) \right]}$
2. $(\sigma_2 \geq \sigma_1 \geq \sigma_3) \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \frac{5\pi}{6} \leq \alpha_0 \leq \pi \\ -\pi \leq \alpha_0 \leq -\frac{5\pi}{6} \end{array} \right\}$	et $FS_{\pi} = \frac{\left(\frac{I_1}{3}\right) \sin \phi + c \cos \phi}{\sqrt{J_{2D}} \left[ -\cos \alpha_0 + \frac{\sin \phi}{\sqrt{3}} \sin \alpha_0 \right]}$
3. $(\sigma_2 \geq \sigma_3 \geq \sigma_1) \Rightarrow \frac{-5\pi}{6} \leq \alpha_0 \leq -\frac{\pi}{2}$	et $FS_{\pi} = \frac{\left(\frac{I_1}{3}\right) \sin \phi + c \cos \phi}{\sqrt{J_{2D}} \left[ -\cos \left( \alpha_0 - \frac{\pi}{3} \right) - \frac{\sin \phi}{\sqrt{3}} \sin \left( \alpha_0 - \frac{\pi}{3} \right) \right]}$
4. $(\sigma_3 \geq \sigma_2 \geq \sigma_1) \Rightarrow -\frac{\pi}{2} \leq \alpha_0 \leq -\frac{\pi}{6}$	et $FS_{\pi} = \frac{\left(\frac{I_1}{3}\right) \sin \phi + c \cos \phi}{\sqrt{J_{2D}} \left[ \cos \left( \alpha_0 + \frac{\pi}{3} \right) - \frac{\sin \phi}{\sqrt{3}} \sin \left( \alpha_0 + \frac{\pi}{3} \right) \right]}$
5. $(\sigma_3 > \sigma_1 > \sigma_2) \Rightarrow -\frac{\pi}{6} \leq \theta_0 \leq \frac{\pi}{6}$	et $FS_{\pi} = \frac{\left(\frac{I_1}{3}\right) \sin \phi + c \cos \phi}{\sqrt{J_{2D}} \left[ \cos \alpha_0 + \frac{\sin \phi}{\sqrt{3}} \sin \alpha_0 \right]}$
6. $(\sigma_1 \geq \sigma_3 \geq \sigma_2) \Rightarrow \frac{\pi}{6} \leq \alpha_0 \leq \frac{\pi}{2}$	et $FS_{\pi} = \frac{\left(\frac{I_1}{3}\right) \sin \phi + c \cos \phi}{\sqrt{J_{2D}} \left[ \cos \left( \alpha_0 - \frac{\pi}{3} \right) - \frac{\sin \phi}{\sqrt{3}} \sin \left( \alpha_0 - \frac{\pi}{3} \right) \right]}$

(D'après Montès, 2013)

**ANNEXE F**  
**ANALYSE DES ANNEAUX DES TUNNELS**  
**SOUS DES CONTRAINTES NATURELLES & INDUITES**  
**(Adapté de Li et Low, 2010)**

Étape 1 : Généralités

- Conditions relativement simples de comportement du matériau milieu élastique linéaire ou élasto-plastique, homogène, isotrope.
- Conditions relativement simples de géométrie
- excavation isolée
- Utilité très limitée pour les sols.

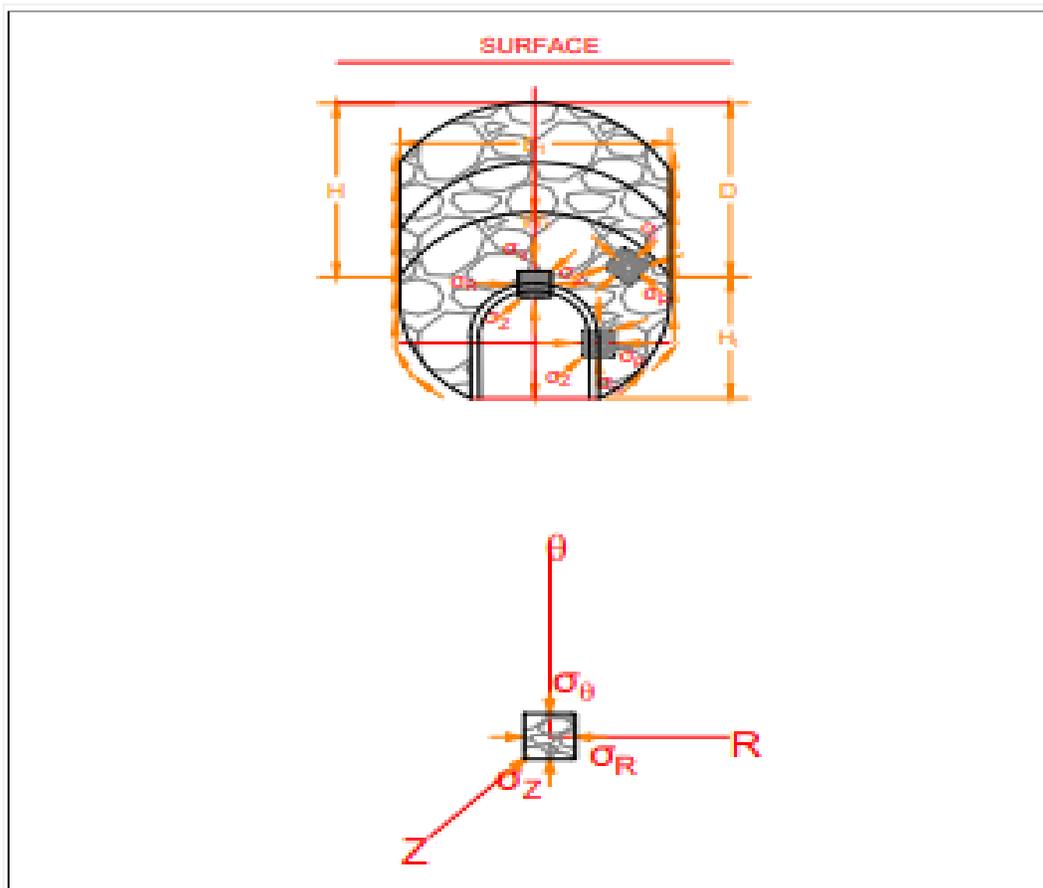


Figure F.1 : Caractéristiques d'un tunnel (Hoek et Brown, 1982)

## Modèles analytiques

Contraintes dans le massif rocheux à une distance radiale  $r$  et un angle  $\theta$  valable seulement pour les hypothèses énoncées précédemment.  $\sigma_v$

Contraintes dans le domaine élastique :

$$\sigma_\theta = p_0 + (p_0 - \sigma_{re}) (r_e / r)^2$$

$$\sigma_r = p_0 - (p_0 - \sigma_{re}) (r_e / r)^2$$

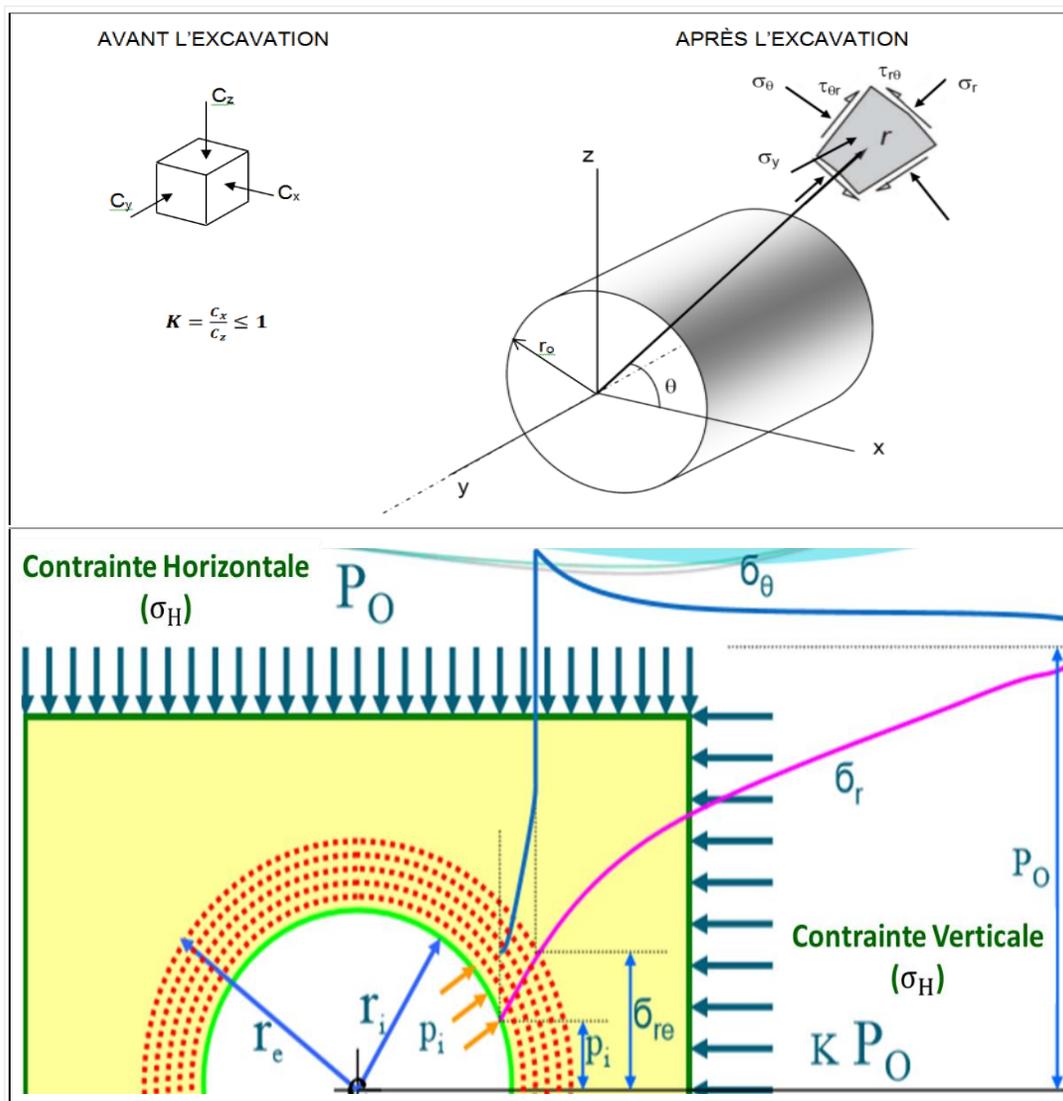


Figure F.2 : Schéma des contraintes agissantes dans le matériau élastique autour d'une cavité circulaire d'un tunnel (Hoek et Brown, 1982)

De façon générale :

$$\sigma_r = C_z \left[ \left( \frac{1+K}{2} \right) \left( 1 + \frac{r_0^2}{r^2} \right) - \left( \frac{1-K}{2} \right) \left( 1 - 4 \frac{r_0^2}{r^2} + 3 \frac{r_0^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right]$$

$$\sigma_\theta = C_z \left[ \left( \frac{1+K}{2} \right) \left( 1 + \frac{r_0^2}{r^2} \right) + \left( \frac{1-K}{2} \right) \left( 1 + 3 \frac{r_0^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right]$$

$$\sigma_y = C_z \left[ 2 \nu \left( \frac{1-K}{2} \right) \frac{r_0^2}{r} \cos 2\theta + \frac{C_y}{C_z} \right]$$

$$\tau_{ry} = \tau_{y\theta} = 0 \text{ (souterrain long, état de déformations planes)}$$

$$\tau_{\theta r} = C_z \frac{r_0^2}{r} \left[ \left( \frac{1-K}{2} \right) \left( 1 + 2 \frac{r_0^2}{r^2} - 3 \frac{r_0^4}{r^4} \right) \sin 2\theta \right]$$

Déplacements dans le massif rocheux à une distance radiale  $r$  et un angle  $\theta$  valable seulement pour les hypothèses énoncées précédemment.

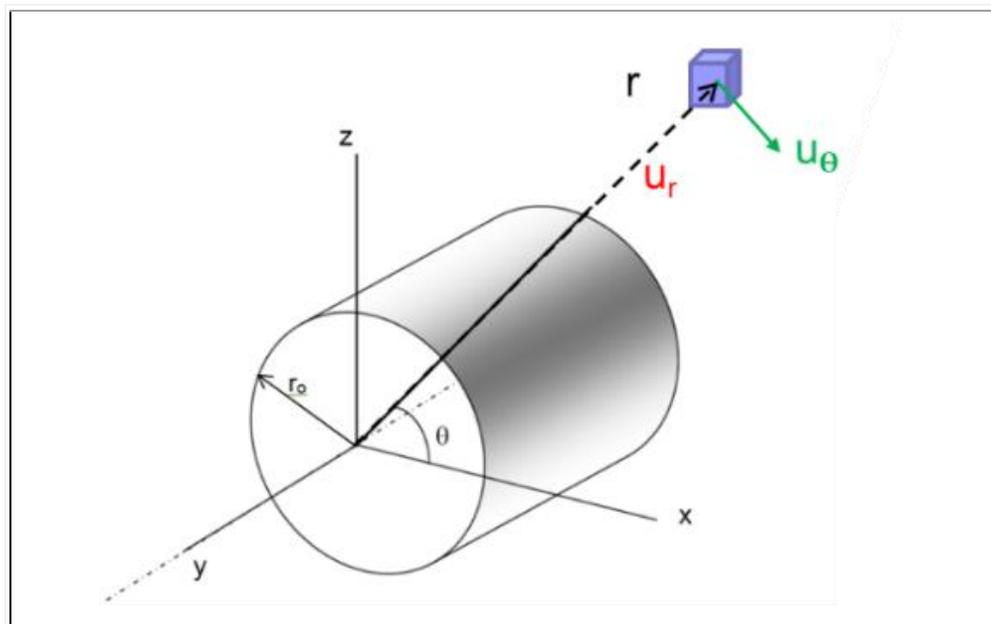


Figure F.3 : Schéma des déformations dans le matériau élastique autour d'une cavité circulaire d'un tunnel (Hoek et Brown, 1982)

Suite à des études sur le comportement élastique des matériaux, Kirsh (1898) proposa les expressions suivantes pour calculer analytiquement la distribution des efforts et des déplacements dans un milieu élastique sous charge non-uniforme contenant une excavation cylindrique.

$$u_r = \frac{1}{2G} C_z \frac{r_0^2}{r} \left[ \left( \frac{1+K}{2} \right) - \left( \frac{1-K}{2} \right) \left( 4(1-\nu) - \frac{r_0^2}{r^2} \right) \cos 2\theta \right]$$

$$u_\theta = \frac{1}{2G} C_z \frac{r_0^2}{r} \left[ \left( \frac{1-K}{2} \right) \left( 2(1-2\nu) - \frac{r_0^2}{r^2} \right) \sin 2\theta \right]$$

$u_y = 0$  (souterrain long, état de déformations planes)

Étape 2 : Analyse des contraintes d'un massif rocheux élasto-plastique

Théorie de Mohr-Coulomb modifiée (Deb, 2006)

- Rayon de la zone d'érouissage (yield zone) :

$$r_e = r_i \left[ \frac{(1-\sin\phi)(p_0 + c \operatorname{tg}\phi)^{-1}}{(p_i + c \operatorname{tg}\phi)^{-1}} \right]^{(2\sin\phi)/(1-\sin\phi)}$$

- Contrainte radiale & tangentielle dans la zone d'érouissage (yield zone) :

$$\sigma_{re} = (1-\sin\phi) \{ p_0 - c \operatorname{tg} (45^\circ + \phi/2) \}$$

- Contrainte radiale & tangentielle dans la zone plastique (plastique zone) :

$$\sigma_r = (p_i + c / \operatorname{tg}\phi) (r/r_i)^{(2\sin\phi)/(1-\sin\phi)} - c / \operatorname{tg}\phi$$

$$\sigma_\theta = (1+\sin\phi)/(1-\sin\phi) * (p_i + c / \operatorname{tg}\phi) (r/r_i)^{(2\sin\phi)/(1-\sin\phi)} - c / \operatorname{tg}\phi$$

Dessinez la variation du déplacement radial différé à la périphérie de l'anneau au plafond ( $\phi = 90^\circ$ ) et au mur ( $\phi = 0^\circ$ ):

- Ordinairement, nous illustrons les valeurs de  $\sigma_\theta$ ,  $\sigma_r$  le long de l'une ou de l'autre des contraintes principales. Voir Figure F.7.

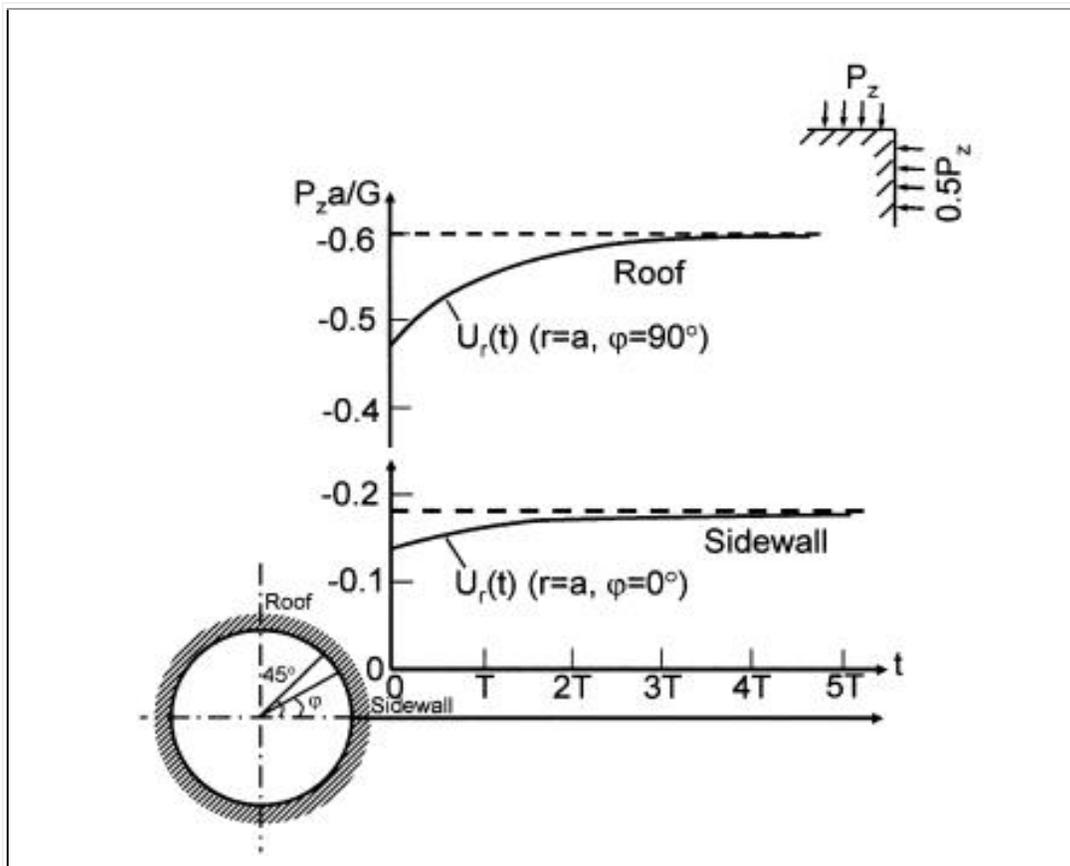


Figure F.7 : Courbe contraintes de cisaillement ( $\sigma_{\theta}$ ) à la voûte ( $r_i$ ) versus  $\Theta$  & Variation du déplacement radial différé à la périphérie de l'anneau au plafond ( $\varphi = 90^\circ$ ) et au mur ( $\varphi = 0^\circ$ ). - Les contraintes radiales et tangentielles dans la zone élastique sont les mêmes avec l'approche de Hoek-Brown mais la distance radiale et la contrainte sont différentes quand le matériau atteint la limite élasto-plastique (Weishen, Z. et al., 2004).

Dessinez la contrainte de cisaillement  $\tau_{\theta r}$  autour de la cavité :

La contrainte de cisaillement est causée par la rupture.

La contrainte de cisaillement maximale à un point vaut la moitié de la différence des contraintes  $\sigma_1$  et  $\sigma_3$ .

$T_{max} = (\sigma'_1 - \sigma'_3)/2$  ou  $(\sigma'_\theta - \sigma'_r)/2$  . Voir Figure F.8.

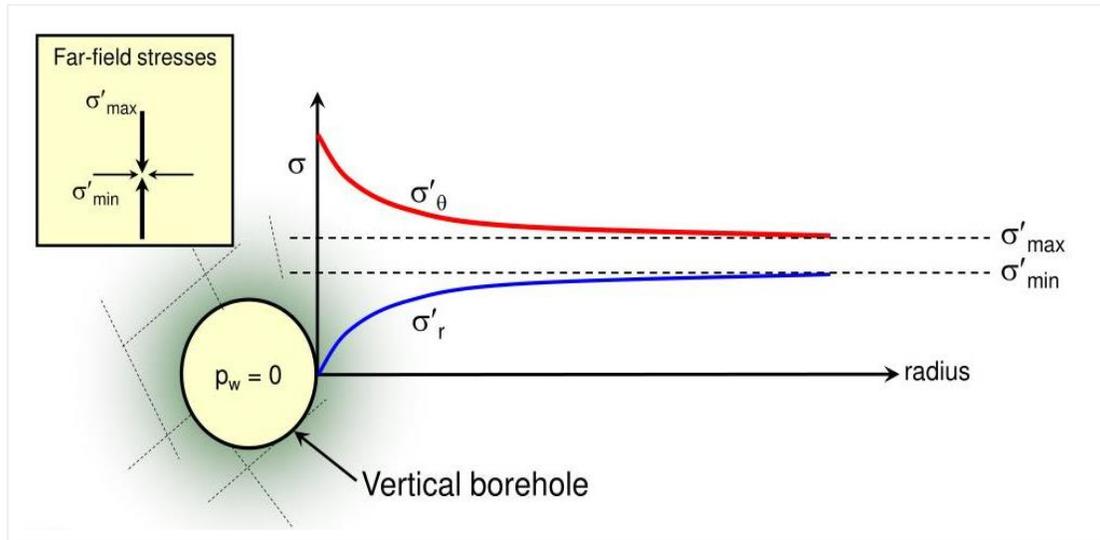


Figure F.8 : Courbe contraintes de cisaillement ( $\sigma_\theta$ ) à la voûte ( $r_i$ ) versus  $\Theta$

Dessinez la variation de contraintes normales tangentielle et radiales différées autour du massif rocheux au plafond ( $\varphi=90^\circ$ ) et au mur( $\varphi=0^\circ$ ) :

Ordinairement, nous illustrons les valeurs de  $\sigma_\theta$ ,  $\sigma_r$  le long de l'une ou de l'autre des contraintes principales. Voir Figure F.9.

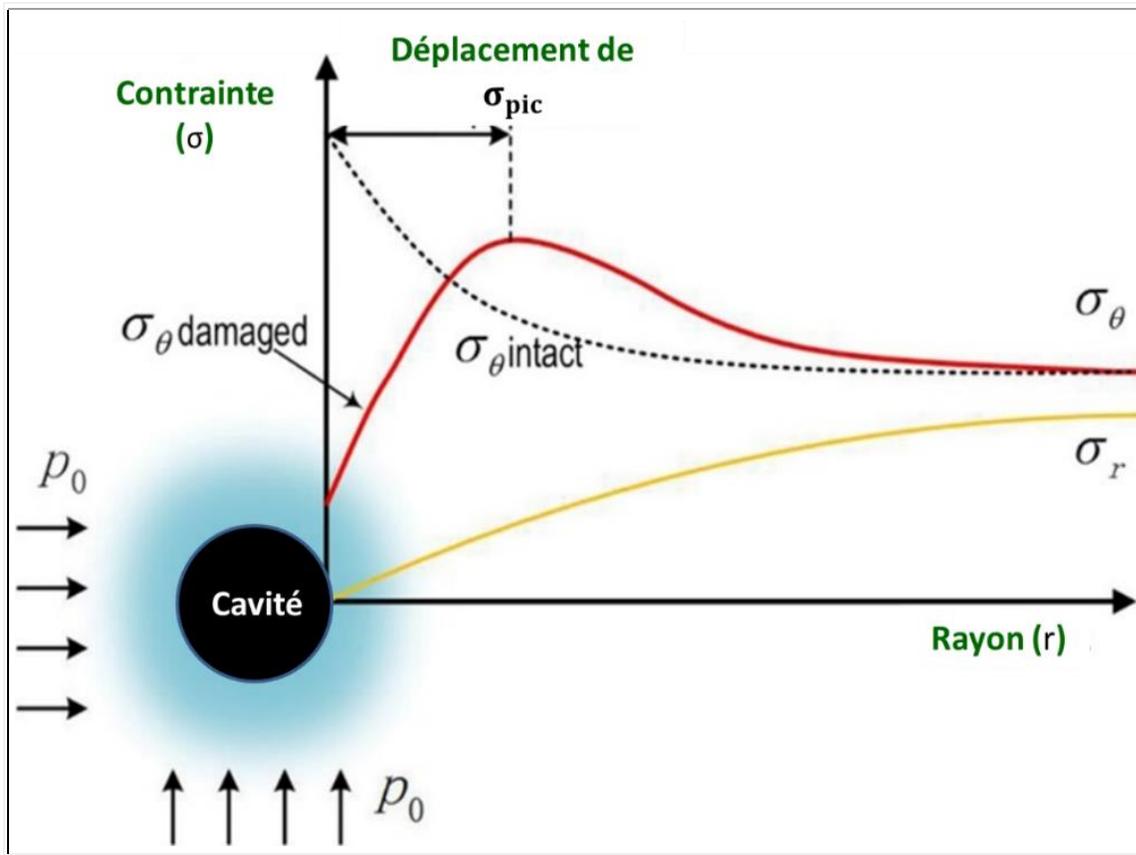


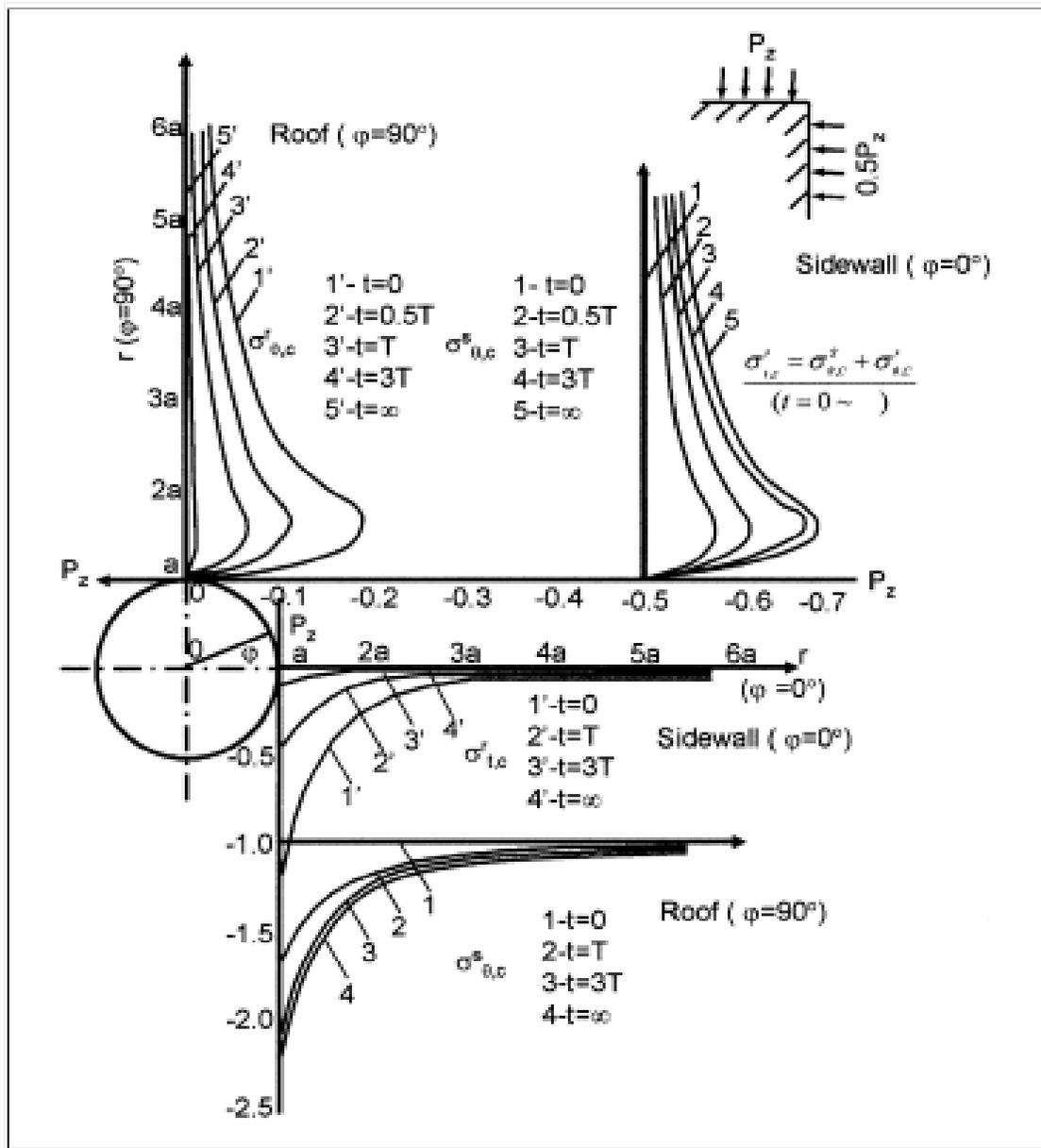
Figure F.5 : Variation des contraintes différées à la périphérie de l'anneau au plafond de la voûte ( $\varphi=90^\circ$ ) et au mur du parement ( $\varphi=0^\circ$ )

Étape 3 : Déterminer les performances du revêtement du tunnel au préalable.

La formulation d'un modèle géotechnique et la prédiction associée du comportement mécanique est un défi que les ingénieurs doivent relever pour optimiser la conception du tunnel et répondre aux exigences du projet. Des défis particuliers surgissent dans les cas où les roches et les masses rocheuses sont sensibles aux effets du temps et les processus dépendant du temps régissent.

Tableau F.1 : Prédiction du niveau de contraintes  
dans le tunnel circulaire de diamètre 8 m

Valeurs K	Position	$\sigma_r$	$\sigma_\theta$	$\sigma_r$	$\sigma_\theta$	$\sigma_r$	$\sigma_\theta$	$r_e / r$
		[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	
		$r_e / r_i = 1$	$r_e / r_i = 1$	$r_e / r_i = a$	$r_e / r_i = a$	$r_e / r_i = 3$	$r_e / r_i = 3$	
0.0	au parement ( $\varphi = 90^\circ$ )	0	6.492135			107.8244	94.83115	
	au parement ( $\varphi = 0^\circ$ )	0	98.57973	17.10838	274.6978	44.15635	120.3015	1.107303
0.5	au parement ( $\varphi = 90^\circ$ )	0	29.31895			107.8635	128.6954	
	au parement ( $\varphi = 0^\circ$ )	0	96.72296	17.62939	282.5393	56.40249	120.502	1.107303
1.0	au parement ( $\varphi = 90^\circ$ )	0	93.04499	12.54237	182.253	103.1719	163.3443	1.081423
	au parement ( $\varphi = 0^\circ$ )	0	89.11074	16.19284	228.8628	101.946	123.778	1.107303
1.5	au parement ( $\varphi = 90^\circ$ )	0	98.32026	12.48047	225.3153	71.98983	152.834	1.081423
	au parement ( $\varphi = 0^\circ$ )	0	101.1026	5.060484	116.8061	98.81843	85.66866	1.038141
2.0	au parement ( $\varphi = 90^\circ$ )	0	94.59695	16.87585	250.9149	54.02807	139.8546	1.11915
	au parement ( $\varphi = 0^\circ$ )	0	55.56047			97.67987	67.67234	
3.0	au parement ( $\varphi = 90^\circ$ )	0	98.52934	17.76429	283.0614	36.06856	127.4216	1.11915
	au parement ( $\varphi = 0^\circ$ )	0	1.580726			96.04901	50.74507	



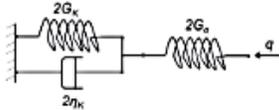
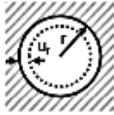
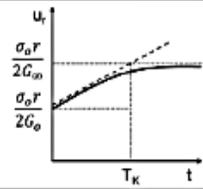
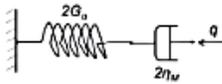
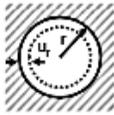
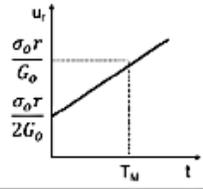
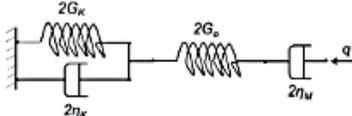
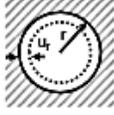
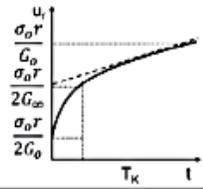
Script PLAXIS, 2019

Figure F.6 : Dépendance temporelle des roches et implications associées au tunneling - Variation de contraintes différées autour du massif rocheux au plafond ( $\varphi=90^\circ$ ) et au mur ( $\varphi=0^\circ$ ). - Les contraintes radiales et tangentielles dans la zone élastique sont les mêmes avec l'approche de Hoek-Brown mais la distance radiale et la contrainte sont différentes quand le matériau atteint la limite élasto-plastique (Weishen, Z. et al., 2004).

**ANNEXE G**  
**SENSIBILITÉ DES PARAMÈTRES<sup>71</sup> VISCOÉLASTIQUES**  
**(Paraskevopoulou C., Diederichs M., 2013)**

Le but de l'Annexe G est de souligner l'importance du choix des paramètres de fluage utilisés dans les différents modèles visqueux disponibles. Pour cette raison, une vaste revue de la littérature est menée, en essayant d'acquérir autant de paramètres de fluage obtenus à la fois à partir des tests en laboratoire et in situ de différentes formations (c'est-à-dire calcaire, gneiss, schiste, etc.). Pour ce faire, il faut l'aide du Tableau G1 qui synthétise et dresse les variations du déplacement radial différé à la périphérie de l'anneau des modèles rhéologiques étudiées (Kelvin-Voigt, Maxwell et Burgers) et des Tableaux G.2, G.3 qui contiennent les valeurs des paramètres viscoélastiques et viscoplastiques initiaux.

Tableau G.1 : Variation du déplacement radial différé à la périphérie de l'anneau  
(Paraskevopoulou C., Diederichs M., 2013)

Modèle	Ressort-Amortisseur analogues et déplacement radial			
<p style="text-align: center;">Kelvin-Voigt (Generalized Kelvin) <i>(primary)</i></p>		$\frac{1}{G_{\infty}} = \frac{1}{G_0} + \frac{1}{G_K}$ $T_K = \frac{\eta_K}{G_K}$	 <p style="text-align: center;"><math>\sigma_r = 0 \text{ for } t &gt; 0</math></p>	
<p style="text-align: center;">Maxwell <i>(secondary)</i></p>		$T_M = \frac{\eta_M}{G_0}$	 <p style="text-align: center;"><math>\sigma_r = 0 \text{ for } t &gt; 0</math></p>	
<p style="text-align: center;">Burgers <i>(primary &amp; secondary)</i></p>		$\frac{1}{G_{\infty}} = \frac{1}{G_0} + \frac{1}{G_K}$ $T_K = \frac{\eta_K}{G_K}$	 <p style="text-align: center;"><math>\sigma_r = 0 \text{ for } t &gt; 0</math></p>	

<sup>71</sup> L'accent principal est cependant mis sur les paramètres élastiques et principalement sur le module d'Young (E). Chacun des quatre paramètres viscoélastiques (viscosité Maxwell  $\eta_M$  et module de cisaillement  $G_M$ , viscosité Kelvin  $\eta_K$  et module de cisaillement  $G_K$ ) est comparé au module d'Young élastique.

Tableau G.2 : Valeurs des paramètres viscoélastiques initiaux

	<b>E = ?</b> [MPa]	<b>ν = ?</b>	<b>K = ?</b> [MPa]	<b>G = ?</b> [MPa]
G, E	60 000	$\frac{E - 2G}{9K - E}$	$\frac{GE}{3(3G - E)}$	24793
G, ν	60 000	0,21	$\frac{3G(1 + \nu)}{3(1 - 2\nu)}$	24793
G, K	$\frac{9KG}{3K + G}$	$\frac{3K - 2G}{6K + 2G}$	20000	24793
E, ν	60 000	0,21	$\frac{E}{3(1 - 2\nu)}$	24793
E, K	60 000	$\frac{3K - E}{3K + G}$	20000	$\frac{3KG}{9K - E}$
ν, K	$3K(1 - 2\nu)$	0,21	20000	$\frac{3K(1 - 2\nu)}{2(1 + \nu)}$

Tableau G.3: Valeurs des paramètres viscoplastiques initiaux

	<b>E<sub>0</sub> = ?</b> [MPa]	<b>ν = ?</b>	<b>K<sub>0</sub> = ?</b> [MPa]	<b>G<sub>0</sub> = ?</b> [MPa]
G, E	$E = \sigma/\varepsilon = 236,75/0,005$	$\frac{E - 2G}{9K - E}$	$\frac{GE}{3(3G - E)}$	92804
G, ν	47 350	0,21	$\frac{3G(1 + \nu)}{3(1 - 2\nu)}$	92804
G, K	$\frac{9KG}{3K + G}$	$\frac{3K - 2G}{6K + 2G}$	15783	92804
E, ν	47 350	0,21	$\frac{E}{3(1 - 2\nu)}$	92804
E, K	47 350	$\frac{3K - E}{3K + G}$	15783	$\frac{3KG}{9K - E}$
ν, K	$3K(1 - 2\nu)$	0,21	15783	$\frac{3K(1 - 2\nu)}{2(1 + \nu)}$

Des équations tirées de ces modèles, il s'ensuit les valeurs des paramètres utilisés dans les analyses présentées. Voir le Tableau G.4 pour des détails.

Tableau G.4: Paramètres utilisés dans les analyses présentées  
(Paraskevopoulou C., Diederichs M., 2013)

Researchers	Year	Geological Formation	Test Method	$G_K$ (Pa)	$G_M$ (Pa)	$\eta_K$ (Pa*s)	$\eta_M$ (Pa*s)	E (Pa)
Chin & Rogers	1987	Clay Shales	In Situ	8.18E+08	1.86E+08	2.10E+13	9.21E+13	5.01E+08
		Weathered Limestone	In Situ	1.95E+08	2.20E+08	3.92E+13	5.84E+16	5.77E+08
		Weathered Tuff	In Situ	3.39E+08	4.97E+08	2.13E+13	6.06E+13	1.28E+08
<b>Malan et al.</b>	<b>1997</b>	<b>Quartzite</b>	<b>Lab</b>	<b>6.00E+10</b>	<b>1.4E+12</b>	<b>1.62E+17</b>	<b>3.24E+15</b>	<b>8.80E+10</b>
Abass et al.	2003	Khuff	Lab	1.10E+11	2.00E+10	1.66E+13	9.10E+14	4.14E+10
Bonini et al.	2007	Clay Shales	Lab	3.07E+07	1.92E+07	1.07E+12	4.22E+13	1.92E+06
Apuani et al.	2007	Gneiss	Lab	1.22E+09	1.22E+09	1.00E+20	1.00E+20	3.16E+10
		Mylonite	Lab	6.73E+08	6.73E+08	1.00E+19	1.00E+19	1.75E+09
Fifer Bizjak & Zupancic	2007	Landslide Gravel Material	Lab	5.92E+04	1.92E+05	2.14E+06	2.95E+07	3.00E+06
		Landslide Gravel Material	Lab	1.53E+05	1.11E+06	5.02E+06	1.30E+09	3.00E+06
Ahmadi et al.	2007	Sandstone	Lab	3.24E+10	3.88E+09	6.45E+15	5.10E+16	4.50E+09
			Lab	7.46E+10	4.02E+09	9.53E+15	2.94E+16	4.50E+09
		Mudstone	Lab	4.29E+10	3.88E+09	6.59E+15	2.75E+16	4.50E+09
			Lab	9.60E+09	2.16E+09	2.27E+15	7.48E+15	2.00E+09
			Lab	9.50E+09	2.84E+09	1.12E+15	6.73E+15	2.00E+09
Barla et al.	2008	Carboniferous Formation (Shists, Sandstones, Coal, Clay-like Shales & Cataclastic Rocks)	In Situ	4.98E+08	5.76E+08	1.35E+14	8.82E+14	1.44E+09
Barla et al.	2010	Carboniferous Formation (Shists, Sandstones, Coal, Clay-like Shales & Cataclastic Rocks)	Lab	4.98E+08	5.66E+08	1.34E+14	8.82E+14	1.18E+09

Le Tableau G.5 indique les valeurs comparées des paramètres de fluage viscoélastiques

Tableau G.5 : Comparaison des paramètres de fluage viscoélastique – Le Module de cisaillement de Kelvin ( $G_K$ ), le Module de cisaillement de Maxwell ( $G_M$ ), la Viscosité de Kelvin ( $\eta_K$ ), la Viscosité de Maxwell ( $\eta_M$ ) avec le module de Young (E). (Paraskevopoulou et Diederichs, 2013).

Type Roche	Classe	Geological Formation	Test Method	$G_K$ (Pa)	$G_M$ (Pa)	$\eta_K$ (Pa*s)	$\eta_M$ (Pa*s)	Chercheurs	
Métamorphique	Pas de foliation	Quartzite	Lab	6.00E+10	1.4E+12	1.62E+17	3.24E+15	Malan et al., 1997	
		Quartzite	In situ	1.47E+11	5.00E+12	8.28E+15	9.00E+14	Malan et al., 1998	
	Peu de foliation	Gneiss	Lab	1.22E+09	1.22E+09	1.00E+20	1.00E+20	Apuani et al, 2007	
		Foliation	Mylonite	Lab	6.73E+08	6.73E+08	1.00E+19	1.00E+19	Apuani et al, 2007
			Phillite	Lab	2.80E+10	1.60E+10	3.06E+14		
Ignée	Plutonique	Granite	In situ	7.00E+11	5.10E+10	3.70E+14	9.50E+18	Shen et Xu, 2007	
		Granite	In situ	2.00E+11	4.10E+10	8.50E+14	3.50E+18		
		Granite	In situ	6.00E+11	3.00E+10	3.60E+14	8.50E+18		
		Granite	In situ	8.00E+11	4.00E+10	7.80E+14	3.00E+18		
		Granite	In situ	5.00E+11	3.00E+10	1.80E+14	8.00E+18		
	Volcanique	Andesite	Simulation numérique	6.00E+08	3.85E+08	5.00E+15	2.50E+17	Guan et al., 2008	
		Andesite	Simulation numérique	8.00E+08	3.85E+08	5.00E+15	5.00E+17		
		Andesite	Simulation numérique	4.00E+08	3.85E+08	5.00E+16	2.50E+17		
		Lava	Lab	8.80E+08	2.10E+12	6.48E+15	1.37E+16	Malan et al., 1997	
Tuff	In situ	3.39E+08	4.97E+08	2.13E+13	6.06E+13	Chin et Rogers, 1997			

Sommairement, les résultats de cette analyse sont présentés à la Figure G.6.

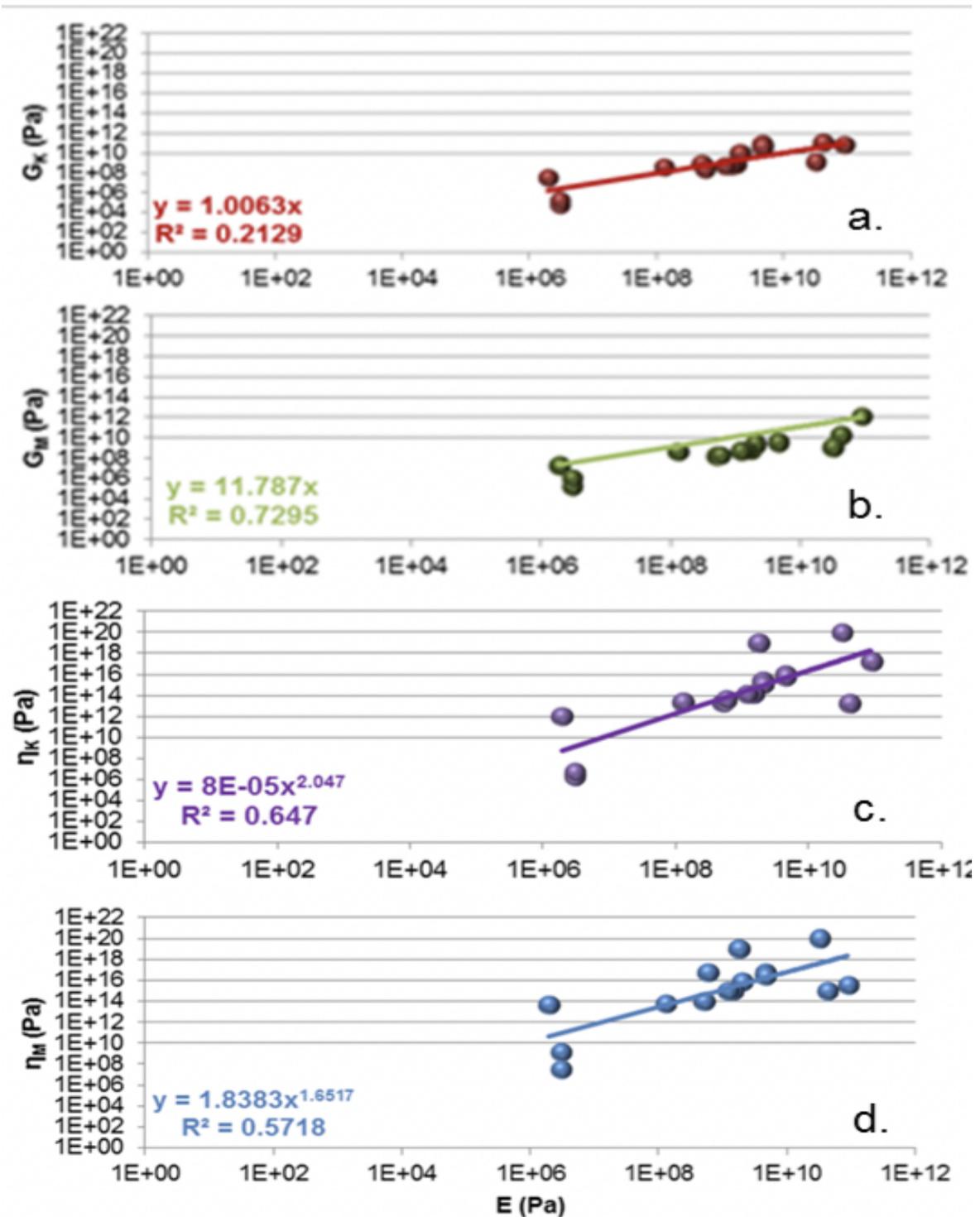
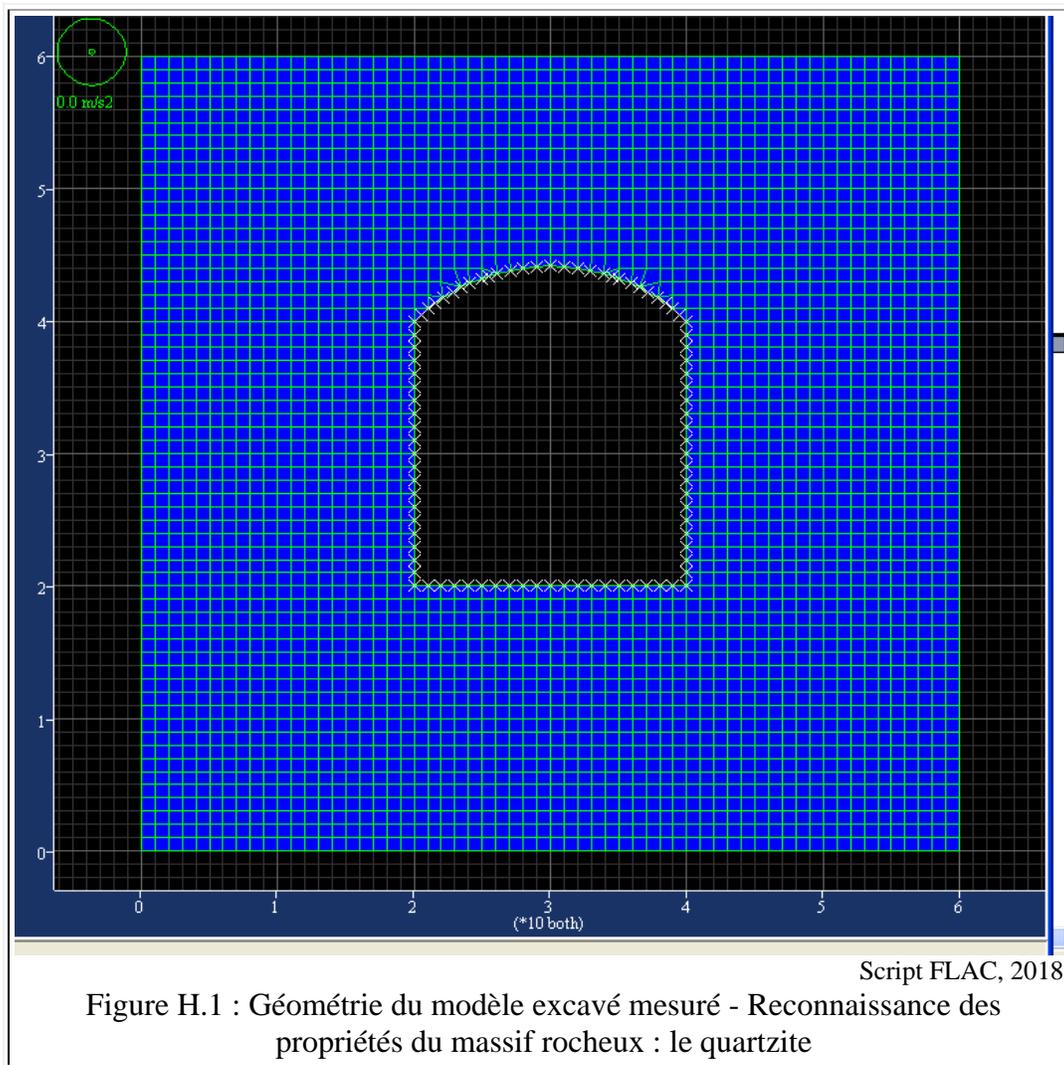


Figure G.6 : Comparaison du module de cisailment Kelvin Shear Modulus ( $G_K$ ), Maxwell Shear Modulus ( $G_M$ ), Kelvin viscosity ( $\eta_K$ ) et Maxwell viscosity ( $\eta_M$ ) avec le Module de Young ( $E$ ). - . Axes x and y sont à échelle logarithmique (Paraskevopoulou C., Diederichs M., 2013).

**ANNEXE H**  
**FAMILIARISATION AVEC LA THÉORIE SUR LE MAILLAGE**  
**DES MÉTHODES D'ÉLÉMENTS FINIS (FEM) & DE DIFFÉRENCES FINIES (FDM)**  
**(Adapté du code FLAC2D, v.8.0 & du code PLAXIS, v. 8.2)**

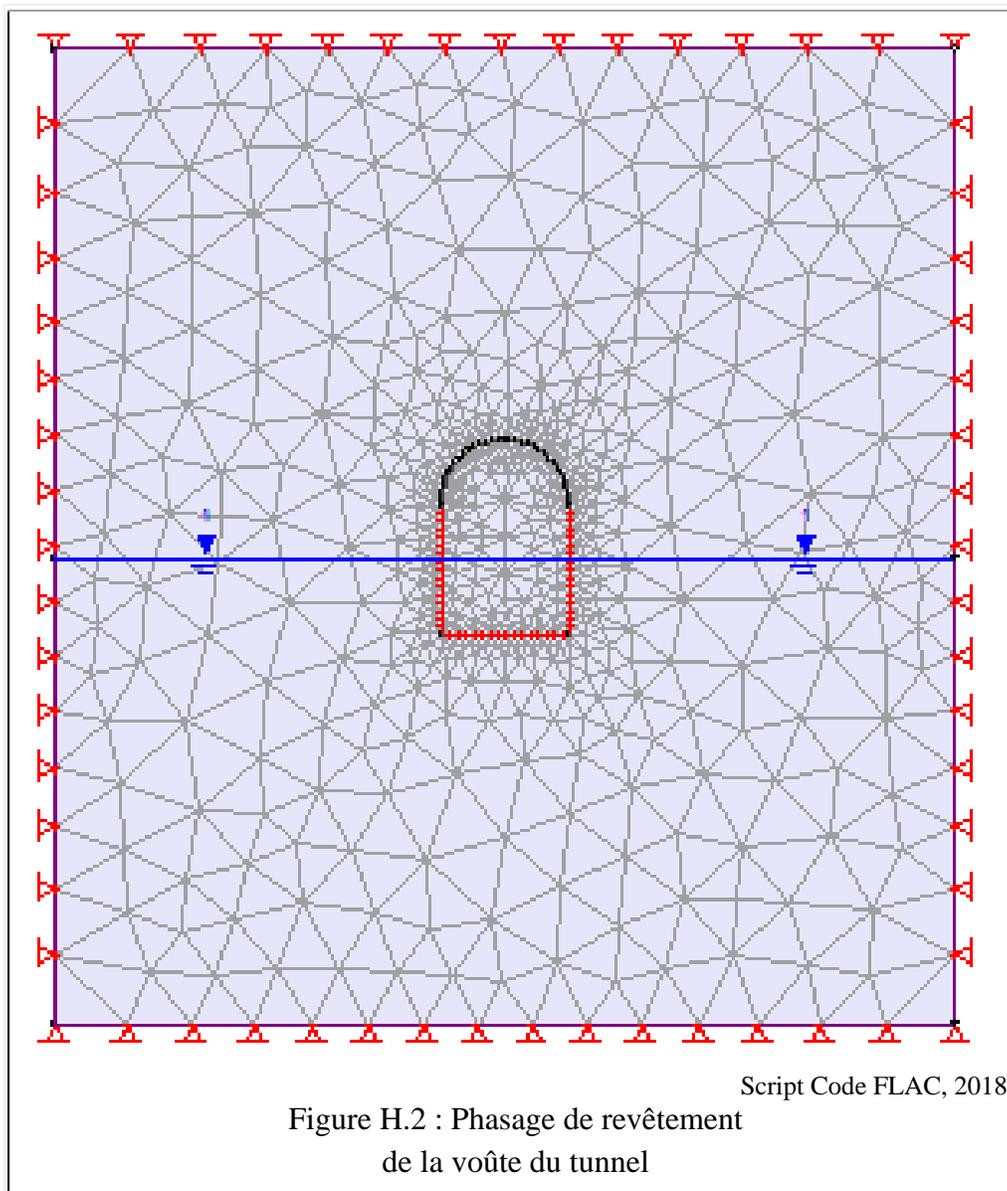
Voici sous forme de logigramme le plan de fonctionnement de simulation avec PLAXIS<sub>2D</sub> ou FLAC<sub>2D</sub>.

Étape 1 Générer le modèle de maillage; assigner son matériau, ses propriétés et les conditions frontières qui le sous - tendent.



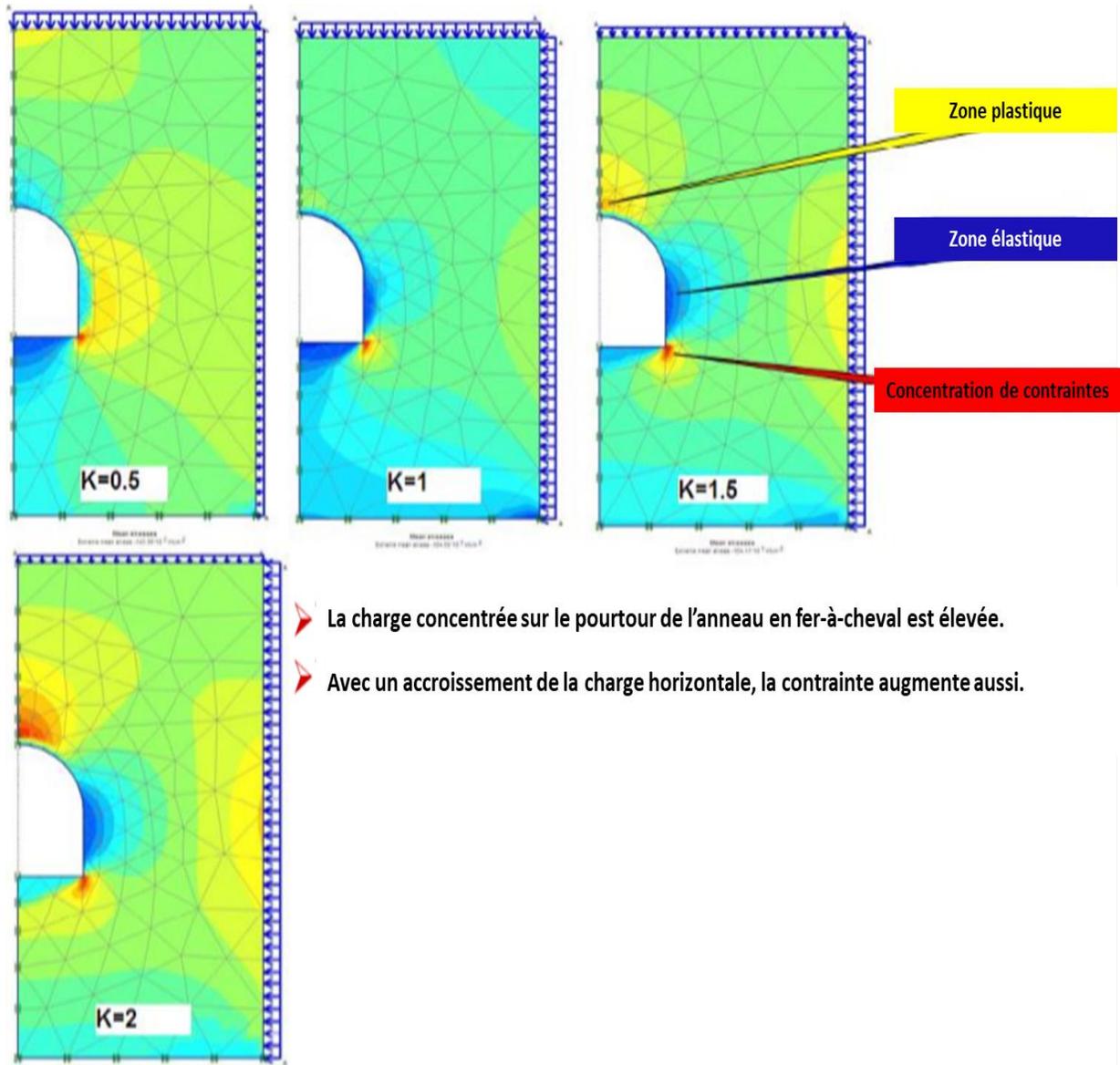
- Sélectionner les données brutes recueillies.
- Définir la géométrie (W et L).
- Définir les conditions limites (P,  $u_1=0$ ).
- Définir les propriétés mécaniques (E et  $\nu$ ).

Étape 2 Excaver le massif rocheux. et déterminer les contraintes initiales du modèle & appliquer les perturbations contraignantes ( poids des terres, pression hydraulique etc.).



### Étape 3 : Modélisation du tunnel chargé

Voici un modèle numérique de tunnel, son maillage d'éléments finis simulé avec PLAXIS2D .



Script PLAXIS, 2019

Figure H.3 : Influence du champ de contraintes

## ANNEXE I

### SÉLECTION DE CODES ADÉQUATS

C'est une suite complémentaire de plusieurs méthodes de calculs analytiques et numériques qui se révèlent efficaces pour l'analyse de stabilité de galeries souterraines, de l'interaction massif rocheux-infrastructure. La synthèse de commande de notre système à variable d'état, en l'occurrence de réglage de contraintes du complexe (infrastructure) versus ses perturbations, a été réalisée en appliquant deux (2) processus complémentaires (modélisation rhéologique du système / simulation numérique du modèle) à réponses chevauchantes.

De la modélisation à la simulation, les sélections des Codes et de méthodes d'approches sont justifiées. Les caractéristiques de ces *processus* sont résumées dans les Tableaux I.1 et I.2. L'extension de ces méthodes à des systèmes d'ordre plus élevé poseront différents problèmes. Les techniques de commande optimale sont, en principe, indépendantes de l'ordre du système. Dans une analyse numérique (tel est notre cas), c'est de la modélisation de variables d'état, de la simulation numérique qui s'imposent. De ce fait, nous choisissons de confronter notre modèle développé avec les résultats des codes MatLab-Simulink, PLAXIS<sub>2D</sub> et FLAC<sub>2D</sub> qui nous ont produit plusieurs solutions-variantes comparatives.

Les critères d'évaluation permettent de quantifier le rendement du système en considérant l'importance relative des objectifs.

#### 1. Étude des méthodes d'approches

Le Tableau I.1 étudie de codes de modélisation et de simulation en fonction de certains critères d'approches.

Tableau I.1 : Étude de codes de modélisation et de simulation

VARIANTES	CRITÈRES D'APPROCHES				DÉCISION
	GÉOMETRIE	DOMAINE	TECHNIQUES ASSEMBLAGE D ELEMENTS	APPROCHES MODELISATION & SIMULATION	
CODE 1 : MATLAB (ELEMENTS DISTINCTS)	<i>Aucun environnement graphique</i>	<i>Données : CONTINUES</i>	Maillage avec Tech. Rés. Explicite (TRE)	Préliminaires et peu coûteuses	REJETÉE <sup>72</sup>
CODE 2 : PLAXIS <sub>2D</sub> (ELEMENTS FINIS)	<i>Toutes les figures (rectangle, cercle, ellipse, fer-à-cheval) sont faisables</i>	<i>Données : DISCRETES.</i>	Maillage avec Tech. Rés. Implicite (TRI)	Intermediaires et coûteuses	<b>RETENUE</b> <sup>73</sup> Comme outil de vérification Économiquement Accessible
CODE 3 : FLAC <sub>2D</sub> (DIFFERENCES FINIES)	<i>Toutes les figures (rectangle, cercle, ellipse, fer-à-cheval) sont faisables</i>	<i>Données : DISCRETES</i>	Maillage avec Tech. Reso. Explicite (TRE)	Avancées et couteuses	<b>RETENUE</b> <sup>74</sup>

Tableau I.2 : Comparaison par paires des critères de décision <sup>75</sup>

<sup>72</sup> Code 1 : non prioritaire puisque la méthodologie est fastidieuse et l'approche est difficile mais le respect du cadre spatio-temporel est pris en compte.

<sup>73</sup> Code 2 : prioritaire puisque la méthodologie est facile et l'approche est complexe mais le respect du cadre spatial n'est pris en compte.

<sup>74</sup> Code 3 : prioritaire puisque la méthodologie, l'approche sont faciles et le contexte spatio-temporel est pris en compte.

<sup>75</sup> Critères

- Techniques (D) : Les proprios n'ont pas demandé à exploiter la mine. C'est une décision des instances publiques. Jusqu'où on peut aller jusqu'à faire à certains d'endurer les travaux voire exproprier d'autres .
- Domaine (B) : La construction de l'infrastructure ne doit être réalisée si la mine est rentable.

	Critères	Geometrie	Domaine	Maillage	Techniques	Nb.	Nb. modifié Arith.	Poids	
A	Géométrie	-	-	-	-	0	0+1	1/10	10%
B	Domaine	B	-	-	-	2	2+1	3/10	<b>30%</b>
C	Maillage	C	C	-	-	3	3+1	4/10	<b>40%</b>
D	Techniques	A	B	C	-	1	1+1	2/10	20%
<b>TOTAL</b>								10/10	100%

## 2. Validité des méthodes d'approches

L'analyse hiérarchique est utilisée pour valider la cohérence des jugements. Le tableau 8.3 dresse les détails de l'analyse multicritère.

Tableau I.3 : Matrice multicritère de décision

Critères	Pondération	CODE 1 : MATLAB		CODE 2 ; DIDACTU		CODE 3 : FLAC	
		Résultat	Note	Résultat	Note	Résultat	Note
Géométrie	10%	75	10.0	75	10.0	50	5.0
Domaine	30%	50	15.0	75	22.5	100	30.0
Maillage	40%	50	20.0	75	30.0	100	40.0
Techniques	20%	75	10.0	75	10.0	100	15.0
<b>TOTAL</b>	<b>100%</b>		55.0%		72.5%		<b>85.0%</b>

- 
- Maillage (C) : L'infrastructure doit être sécuritaire.
  - Géométrie (A) : L'infrastructure ne doit résister qu'à sa durée de vie utile. La durée de vie utile d'une galerie minière ne doit être que de 50 ans environ.



## RÉFÉRENCES

1. Abdel - Hardy et Herrin , (1966). *Caractéristiques du sol- asphalte en tant que processus de taux*. J. Highway Div., Proc. ASCE, v.92.
2. Aerodat Inc., (1997). *Helicopter-borne total Field magnetic Survey*. Levés héliportés, Échelle 1 : 50 000.
3. AFTES (1993). *Texte des recommandations relatives au choix d'un type de soutènement en galerie*. Groupe de travail n°7.
4. AFTES (1995). *Le choix des paramètres et essais géotechniques utilisés à la conception, au dimensionnement et à l'exécution des ouvrages creusés en souterrain*. Groupe de travail n°7.
5. AFTES (2002). *Recommandations Relatives à la méthode Convergence-Confinement*. Tunnels et Ouvrages Souterrains, N° 170, mars / avril, p. 79 – 89.
6. Akhrif, O (2017). *Modélisation de systèmes linéaires et non linéaires*. Notes de cours, Éditions ETS, 2 tomes, 250 p.
7. Amadei, B. et Stephanson, O. (1997). *Rock stress and its measurement*. Springer.
8. Amitrano, D et Helmstetter, A. (2006). *Fluage fragile, dommages et temps de rupture dans les roches*. Journal of Geophysical Research: Solid Earth Volume 111, numéro B11.
9. Andrade, E., N., C., 1910. *On the viscous flow in metals and allied phenomena*. In: Proc. of R. Soc. London, A, 84, 1-12.
10. Aristorenas, G. (1992). *Time-dependent behavior of tunnels excavated in shale, PhD, MIT*.
11. Arjang, B., 1996. *In situ ground stresses in the Abitibi Mining District*. CIM bulletin, Vol. 89, No. 995, pp. 65-71.
12. Arjang, B., 1989. *Pre-mining stresses at some hard rock mines in the Canadian Shield*. Communication présentée à The 30th US Symposium on Rock Mechanics (USRMS).
13. Aubertin et al. (1987). *Le Comportement rhéologique du Sel. Revue Bibliographique-Tome II. Mécanismes de déformation, modélisation physique, rupture, essais en place*. Rapport EPM/RT-87/32 - École Polytechnique.
14. Aydan, O., Akagi, T., and Kawamoto, T. (1993). *The squeezing potential of rocks around tunnels; Theory and prediction*. J. Rock Mech. Rock Eng., 26 (2), 137-163.
15. Aydan, O., Akagi, T., and Kawamoto, T. (1996). *The squeezing potential of rock around tunnels: theory and prediction with examples taken from Japan*. Rock mechanics and rock engineering, 29 (3), 125-143.
16. Bailon, J.-P. et Dorlot, J.-M., 2019. *Des matériaux*. Ed. Les presses internationales de Polytechnique, Montréal. 736 p.

17. Barla, G. (1995). *Squeezing rocks in tunnels*. International Society Rock Mechanics News J., p. 44-49.
18. Barla, G. (2001). *Tunnelling under squeezing rock conditions*. Tunnel. Mech., Eurosummer School, D. Kolymbas, ed., Logos-Verlag, Berlin.
19. Barla, G., Bonini, M. C., and Debernardi, D. (2007). *Modelling of tunnels in squeezing rock*. Proc., 1st European Community on Computational.
20. Barla, G., et Barla, M. (2008, 2010). *Innovative tunnelling construction methods in squeezing rock. Metodi innovativi per la costruzione di gallerie in rocce spingenti*. Ingegneria Ferroviaria, p. 1017-1031.
21. Barla, G., Debernardi, D., and Sterpi, D. (2012). *Time- Dependent Modeling of Tunnels in Squeezing Conditions*. Int. Geomech.12, Special issue : Advances in Modeling Rock Engineering Problems, 697–710.
22. Barton, N. R. (2000). *TBM tunnelling in jointed and faulted rock*. CRC Press.
23. Bazant, Z., Ansal, A. et Krizek, R. (1979). *Viscoplasticity of Transversely Isotropic Clay*. Journal of The Engineering Mechanics Division, August, pp. 549 – 565.
24. Benford, B., C. DeMets, and E. Calais (2012a). *GPS estimates of microplate motions, northern Caribbean: Evidence for a Hispaniola microplate and implications for earthquake hazard*. Geophys. J. Int., 191(2), 481–490.
25. Benford, B., C. DeMets, B. Tikoff, P. Williams, L. Brown, and M. Wiggins-Grandison (2012b). *Seismic hazard along the southern boundary of the Gônave microplate: Block modelling of GPS velocities from Jamaica and nearby islands, northern Caribbean*. Geophys. J. Int., 190(1), 59–74.
26. Berest, P., Blum, P., Charpentier, J., Gharbi, H., and Vales, F. (2005). *Very slow creep tests on rock samples*. Int J. Rock Mech. Min. Sci., 42, 569-576.
27. Bertrand L., Bonvallet J., Both J., Feuga B. et Wojtkowiak F (1982). *Étude de l'influence d'un trafic routier de fort tonnage sur la stabilité de carrières souterraines abandonnées en Gironde*. Nantes. Industrie Minérale, juin, pp.1-14.
28. BG Ing. Conseils (2012). *Mécanique des roches et travaux souterrains*. Éd. CNS Cachan, 88 p.
29. Bhasin, R. and Grimstad, E. (1996). *The Use of Stress- Strength Relationship in the Assessment of Tunnel Stability*. In Proc. Recent Advances in Tunneling Technology, New Delhi, India.
30. Bieniawski, Z.T. 1967. *Mechanism of Brittle Fracture of Rock, parts I, II, and III*. Rock Mech. Min Sci, 4 (4), 395-430.
31. Bieniawski, Z.T. (1989). *Engineering Rock Mass Classification. A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil, and Petroleum Engineering*. Wiley, New York. pp. 251.
32. Bingham, E.C. (1922). *Fluidity and plasticity*. 1, McGraw-Hill, New York.
33. Bingham et Herschel (2002). *Les origines de la rhéologie: une courte excursion historique*. Edité par RI Tanner , K. Walters, en ligne.

34. Boidy, E., Bouvart, A., and Pellet, F. (2002). *Back-analysis of time-dependent behaviour of a test gallery in claystone*. Tunn. Undergr. Space Technol., 17(4), 415 et 424.
35. Boidy, E. (2002). *Modélisation numérique du comportement différé des cavités souterraines*. Thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier – Grenoble I, 320p.
36. Boisson, D. (1987). *Étude géologique du massif du Nord d'Haïti (Hispaniola), thèse de doctorat (Ph. D. thesis)*. Univ. Pierre et Marie Curie (Paris VI), Paris.
37. Bonini, M., Barla, M., and Barla, G. (2001). *Flac applications to the analysis of swelling behaviour in tunnels*. In: Proc. of 2nd Flac Symposium on Numerical Modelling in Geomechanics, Lyon.
38. Bonini, M., Debernardi, D., Barla, M., and Barla, G. (2009). *The mechanical behaviour of clay shales and implications on the design of tunnels*. J. Rock Mech. Rock Eng., 42 (2), 361-388.
39. Bourque, P.-A. (2010). *Planète terre*. Université de Laval. Département de génie géologique. <http://www2.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/s2/r.ign.html>
40. Bousquet, M. (2017). *50 théories mathématiques*. Edition ESI Savoirs, Paris, 2017.
41. Brace W.R. Paulding, B.W.Jr., and Scholz C. 1966. Dilatancy in the fracture of crystalline rocks. J. Geophys. Res., 71 (3939-3953), 40-65.
42. Brady, B. H., et Brown, E. T. (2013). *Rock mechanics: for underground mining*. Springer Science & Business Media.
43. Brantut N., Heap, M.J., Meredith, P.G., and Baud, P. (2013). *Time-dependent cracking and brittle creep in crustal rocks: a review*. J. Struct. Geol., 52, 17-43.
44. Brown, A. (1982). *The influence and control of groundwater in large slopes, in Stability in Surface Mining*. Edition C.O. Brawner, pp. 19-41.
45. Brown, E. (2008). *Estimating the mechanical properties of rock masses*. Communication présentée à Proceedings of the 1st Southern Hemisphere International Rock Mechanics Symposium, Australian Centre for Geomechanics, Perth, p. 3-22.
46. Bukharov, G.N., Chanda, M.W., and Bukharov, N.G. (1995). *The three processes of brittle crystalline rock creep*. Int. J. Rock Mech. Min Sci. & Geomech, 32 (4), 325-335.
47. Burgers, J.M. 1948. *A mathematical model illustrating the theory of turbulence*. Advances in applied mechanics, 1, 171-199.
48. Burke, K., 1988. *Tectonic evolution of the Caribbean*. Annu. Earth Planet Sc. 16, 201–230.
49. Buterlin J. (1990). *Géologie générale et régionale de la république d'Haïti*. Éditions de l'IHEAL, Paris, 194 p.
50. Cabriolu, R. et al. (2018). *Precursors of fluidisation in the creep response of a soft glass*.
51. Calais, E., Mercier de Lepinay, B. (1991). *From transtension to transpression along the northern Caribbean plate boundary off Cuba: implications for the recent motion of the Caribbean plate*. Tectonophysics 186 (3), 329–350.
52. Calais, E., Freed A., G. Mattioli, F. Amelung, S. F. J. Jónsson, P. Jansma, S.-H. Hong, T. Dixon, C. P. Prépetit, and R. Momplaisir (2010). *Transpressional rupture of an unmapped fault during the 2010 Haïti earthquake*. Nat. Geosci., 794–799.

53. Calais, E., Symithe, S., Mercier de Lépinay, B., Prépetit, C. (2016). *Plate boundary segmentation in the northeastern Caribbean from geodetic measurements and Neogene geological observations*. Geosci. 348 (1), 42–51.
54. Calmus, T., 1983. *Contribution à l'étude géologique du massif de Macaya (sud-ouest d'Haïti, Grandes Antilles): sa place dans l'évolution de l'orogène Nord-Caraïbe, thèse de doctorat*. Univ. Paris VI, Paris.
55. Carter, T.G. (1992). *A new approach to surface crown pillar design*. Proc. 16th. Canadian Rock Mechanics Symposium, Sudbury, 75-83.
56. Carter, T.G. (1992). *Prediction and uncertainties in geological engineering and rock mass characterization assessments*. Proc. 4th. int. rock mechanics conf., Torino. Paper 1.
57. Charrette, F. et Hadjigeorgiou, J. (2009). *Guide pratique du soutènement minier*. 2e édition. Association minière du Québec. 161 p.
58. Chau, K.T. (2004). *Analytic method in geomechanics*. CRC Press, 350 p.
59. Cheilletz, A. et al. (1982). *Inventaire et carte des gîtes minéraux d'Haïti*. Science de la Terre, tome 28, no. 4.
60. Christensen, R. et Wu, T. (1964). *Analyse de la déformation de l'argile en tant que processus de taux*. J. Soil Mech. Div., Proc. ASCE, v.90 .
61. Cidivini, A., Gatti, G., Gioda G. 1979. *Anisotropic consolidation of initially isotropic soils*, In *Proceedings Euromechanics Colloq. on Mechanical Behavior of Anisotropic Solids*. Grenoble.
62. Cristescu N.D., and Gioda, G. 1994. *Visco-plastic behaviour of geomaterials*. Springer Verlag, New York
63. Colas, J. (2008). *Review of the potential of Mémé and Casséus mines, Terre neuve and Jean Rabel areas with recommendations for action*. 56 p.
64. Corbeau, J. (2015). *Dynamique d'une frontière transformante dans un contexte de collision oblique : étude de la limite Nord de la plaque Caraïbe dans la région d'Haïti*. Thèse, Paris, 250 p.
65. Corbeau, J., Rolandone, F., Leroy, S., Mercier de Lépinay, B., Meyer, B., Ellouz-Zimmermann, N., Momplaisir, R., 2016a. *The Northern Caribbean plate boundary in the Jamaica Passage: structure and seismic stratigraphy*. Tectonophysics 675, 209–226.
66. Corbeau, J., Rolandone, F., Leroy, S., Meyer, B., Mercier de Lépinay, B., Ellouz-Zimmermann, N., Momplaisir, R., 2016b. *How transpressive is the Northern Caribbean plate boundary?* Tectonics. <http://dx.doi.org/10.1002/2015TC003996>.
67. Corbeau, J. et al. (2017). *Crustal structure of western Hispaniola (Haiti) from a teleseismic receiver function study*. Tectonophysics, Elsevier, 2017.
68. Corthésy, R., Leite, M. H., He, G., Gill, D. E., et Germain, P. (1994). *First application of the RPR method to field measurements*. Communication présentée à 1st North American Rock Mechanics Symposium.
69. Corthésy, R., Leite, M. H., He, G. et Gill, D. E. (1997). *Élaboration d'un modèle de prédiction des contraintes in situ dans le Nord-Ouest québécois*. Rapport final de l'IRSST, Montréal, QC, 48 p.

70. Corthésy, R. et al. (1999). *Notes du cours GLQ4602 – Géomécanique*. Éditions École Polytechnique, Montréal, QC, 120 p.
71. Corthésy, R. et Leite, M. H. (2008). *Mesures des contraintes in-situ à la mine Doyon - projet Westwood Montréal*. Centre de développement technologique.
72. Cosar, S. (2004). *Application of mass classification systems for future support design of the dim tunnel near Alanya*. Thesis in mining engineering, Middle East technical university, 220 p.
73. Cristescu N.D., and Gioda, G. (1994). *Viscoplastic behaviour of geomaterials*. Springer Verlag, New York.
74. Cristescu, N.D. (1994). *Viscoplasticity of geomaterials*. In: Proc. of Cristescu ND, Gioda G, editors. *Visco-plastic behaviour of geomaterials*. New York: Springer.,103207.
75. Cristescu et al. (1998). *Time effects in rock mechanics*. Éditions John Wiley & sons, inc., 342 p.
76. Cristescu, N.D. 2009. *Time effects in rock mechanics*. In Proceedings of the SME Annual Conference, Albuquerque, New Mexico.
77. Damjanac, B., and Fairhurst, C. (2010). *Evidence for a long-term strength threshold in crystalline rock*. *Rock Mech. Rock Eng.*, 43 (5), 513-531.
78. Deb, D. 2006, *Finite Element Method, Concepts and Applications in Geomechanics*. Prentice Hall of India Private Limited, New Delhi-110001, ISBN-81-203-2983-X.
79. Debernardi, D. 2008. *Visco-plastic behavior and design of tunnels*. Ph.D. thesis, Dept. of Structural and Geotechnical Engineering, Politecnico di Torino, Torino, Italy.
80. Deere, D.U. (1989). *Rock quality designation (RQD) after 20 years*. U.S. Army Corps Engrs Contract Report GL-89-1. Vicksburg, MS: Waterways Experimental Station.
81. Deere, D.U. et Deere, D.W. (1988). *The rock quality designation (RQD) index in practice in Rock classification systems for engineering purposes*. Edition L. Kirkaldie, ASTM special Publication 984, 91-101. Philadelphia: Am. Soc.Test. Mat.
82. Deere, D.U., Hendron, A.J., Patton, F.D. and Cording, E.J. (1967). *Design of surface and near surface construction in rock*. In Failure and breakage of rock, proc. 8th U.S. symp. rock mech., (ed. C. Fairhurst), 237-302. New York: Soc. Min. Engrs, Am. Inst. Min. Metall. Petrolm Engrs.
83. De Rosnay, J. (1995). *Le Macroscopie*. Éditions Le Seuil, 228 p.
84. Desai, C., and Zhang, D. (1987). *Visco-plastic model for geologic materials with generalized flow rule*. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 11 (6), 603-620.
85. Diederichs, M.S. (1999). *Instability of hard rockmasses: The role of tensile damage and Relaxation*. Ph.D. Thesis, University of Waterloo, Canada.
86. Diederichs, M.S. (2003). *Rock fracture and collapse under low confinement conditions*. *Rock Mech. Rock Eng.*, 36 (5), 339-381.
87. Diederichs, M.S. (2007). *The 2003 CGS Geocolloquium Address: Damage and spalling prediction criteria for deep tunnelling*. *Can Geotech J*; 44, 1082-1116.

88. Diederichs, M.S., Kaiser, P.K., and Eberhardt, E. (2004). *Damage initiation and propagation in hard rock during tunnelling and the influence of near-face stress rotation*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 41(5), 785-812.
89. Diederichs, M.S., and Martin, C.D. (2010). *Measurement of spalling parameters from laboratory testing*. In: Proc. of Eurock 2010, Lausanne, Switzerland.
90. Dolan, J., Mann, P., de Zoeten, R., Heubeck, C., Shiroma, J., Monechi, S. (1991). *Sedimentologic, stratigraphic, and tectonic synthesis of Eocene-Miocene sedimentary basins, Hispaniola and Puerto Rico*. Geol. Soc. Am. Spec. Pap. 262, 217–264.
91. Dolan, J. et D.Wald, (1998). *The 1943-1953 northcentral Caribbean earthquakes: Active tectonic setting, seismic hazards, and implications for Caribbean-North America plate motions, in Active Strike-slip and Collisional Tectonics of the Northern Caribbean Plate Boundary Zone*. Edited by J. Dolan and P.Mann, Geol. Soc. Am. Spec. Pap. 326, pp. 143-169, Geological Society of America, Boulder.
92. Dowding, C. (2015). *Construction vibrations*. Edition Prentice Hall International, séries in génie civil et génie mécanique, 600 p.
93. Drucker, DC et Prager, W. (1952). *Mécanique des sols et analyse plastique pour la conception des limites*. Quarterly of Applied Mathematics, vol. 10, non. 2, pp. 157-165.
94. Einstein, H.H. and Bischoff, N. (1975). *Design of tunnels in swelling rocks*. In: *Proc. of the 16th Symposium on Rock Mechanics*. University of Minnesota, Minneapolis, MN, 185-197.
95. Einstein, H.H., Bischoff, N. and Hofmann, E., (1972). *Verhalten von Stollensohlen in quellendem Mergel*. In: *H. Grob and K. Koviri (eds). Proc. of the Int. Symp. on Underground Openings*, Lucerne, Swiss Soc. for Soil Mech. and Found. Engng., Zurich, 296-319 (in German).
96. Einstein, H.H. (1979). *Tunnelling in swelling rock*. Underground Space, 4, 51-6.
97. Einstein, H.H. (1989). *Suggested methods for laboratory testing of argillaceous swelling rocks*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 26, (5), 415-426.
98. Einstein, H.H. (1996). *Tunnelling in difficult ground swelling behaviour and identification of swelling rocks*. J. Rock Mech. Rock Eng., 29 (3), 113-124.
99. Eurasian Mining Company (2008). *Rapport de prospection et de reconnaissance - Indices de minéralisations couvrant les massifs métallogéniques du Nord et de Terre Neuve*. 100 p.
100. Fine, J. (1998). *Le soutènement des galeries minières*. Les Presses de l'Ecole des Mines, Paris, 306 p.
101. Fouquet, Y. (2002). *Sulfures polymétalliques hydrothermaux océaniques*. Les Techniques de l'Industrie Minérale, 15, 51–65.
102. Garafalo, F. et al. (1963). *Conférence internationale sur le fluage*.
103. Gay, N. (1975). *Tectonophysics*. In-situ stress measurements in Southern Africa, 29 (1-4), p. 447-459.
104. Ghoreychi, M. (1990). *Conséquences du comportement thermodynamique du sel pour la conception et la sûreté d'un enfouissement de déchets radioactifs, stockage en souterrain*. Presses de l'ENPC, p. 229 - 243.

105. Gioda, G. and Cividini, A. 1996. *Numerical methods for the analysis of tunnel performance in squeezing rocks*. Rock Mech. Rock Eng. 29 (4), 171-193
106. Glamheden, R. et Hokmark H. (2010). *Creep in jointed rockmasses*. State of the knowledge, SKB.
107. Goodman, R.E. (1980). *Introduction to Rock Mechanics*. John Wiley and Sons, New York.
108. Goodman R. E. (1989). *Introduction to Rock Mechanics (2nd ed.)*. John Wiley & Sons, New York.
109. Gow, P., Upton, P., Zhao, C., & Hill, K. (2002). *Copper-gold mineralisation in New Guinea : numerical modelling of collision, fluid flow and intrusion-related hydrothermal systems*. Austr. J. Earth Sci., 49, 753–771.
110. Granja-Bruña, J., Carbó-Gorosabel, A., Estrada, P.L., Muñoz-Martín, A., ten Brink, U., Ballesteros, M.G., Druet, M., Pazos, A., 2014. *Morphostructure at the junction between the Beata ridge and the Greater Antilles island arc (offshore Hispaniola southern slope)*. Tectonophysics 618, 138–163.
111. Gravel, C. (2012). *Modélisation numérique des contraintes in situ pour la conception des tunnels sous pression non blindés*. École Polytechnique de Montréal.
112. Griggs, D. 1939. *Creep of Rocks*. Journal of Geology. 47, 225-251.
113. Hagros, A., Johanson E., and Hudson J.A. 2008. *Time-dependency in the mechanical properties of crystalline rocks: a literature survey*. Possiva OY, Finland.
114. Hammoun, S. (2017). *Modélisation numérique du comportement mécanique d'une excavation à grande profondeur a l'aide d'une loi d'écrouissage tenant compte des effets du temps – Application a la mine Westwood*. Thèse, École Polytechnique de Montréal, 174 p.
115. Harcouët, V. (2005). *Modélisations thermiques de gisements orogéniques mésothermaux : application au Ghana*, 267 p.
116. Harnish, D. E. (1984). *Casseus Copper Skarn Deposit*. M. Sc. Thesis, University of Wisconsin, preliminary copy.
117. Harnish, D.E. and Philip E. Brown (1986). *Petrogenesis of the Casseus Cu-Fe skarn, Terre-Neuve District, Haiti*. Department of Geology and Geophysics of Wisconsin, Madison, Wisconsin 53706 in Economic Geology, Vol 81 pp 1801-1807.
118. Hatch, M. (2000). *Vibration simulation*. Chapman & Hall, CRC., New York, 650p.
119. Heidbach, O., et al. (2008). *The World Stress Map database release 2008*. doi:10.1594/GFZ.WSM.Rel200.
120. Herget, G. (1986). *Stress assumptions for underground excavations in the Canadian Shield*. Communication présentée Rock stress and rock measurements, Stockholm, pp. 61-68.
121. Herget, G. (1987). *Change of ground stresses with depth in the Canadian shield*. Communication présentée à International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, vol. 24, p.96.
122. Hobbs, B., Zhang, Y., Ord, A., & Zhao, C. (2000). *Application of coupled deformation, fluid flow, thermal and chemical modelling to predictive mineral exploration*. J. Geochemical Exploration, 69.

123. Hoek, E., and Brown, E.T. (1980). *Underground excavations in rock*. London: Instn Min. Metall.
124. Hoek, E., et Brown, E. T. (1986). *Underground excavations in rock*.
125. Hoek, E. (1994). *Strength of rock and rock masses*. ISRM News Journal, 4-16 p.
126. Hoek, E., Kaiser, P.K., Bawden, W.F. (1995). *Support of Underground Excavations in Hard Rock*. pp.215.
127. Hoek et al. (1995). *Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses. The case of the Athens schist formation*. Bulletin Engineering Geological Environmental, pp. 151 - 160.
128. Hoek, E. et Brown, E.T. (1997, 2002). *Practical estimates of rock mass strength*. *Int. J. Rock Mech. & Mining Sci. & Geomech. Abstrs.* 34(8), 1165-1186.
129. Hoek, E. (1998). *Tunnel support in weak rock, Keynote address, Symp. On sedimentary rock engineering, Taipei, Taiwan, 20-22*.
130. Hoek, E. et Marinos, P. (2000). *Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses*. *Tunnels and tunnelling international*, 45-51 p.
131. Hoek, E., Carranza-Torres, C., et Corkum, B. (2002). *Hoek-Brown failure criterion*. Édition. Proceedings of NARMS-Tac, 1, 267-273.
132. Hoek, E., et Diederichs, M. S., (2006). *Empirical estimation of rock mass modulus*. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43(2), 203-215.
133. Hoek, E. (2007). *Practical rock engineering* [En ligne]. Disponible à : [http://www.rocscience.com/education/hoeks\\_corner/](http://www.rocscience.com/education/hoeks_corner/) [cité le 10 août 2018].
134. Holeyman, A., (2017). *Comportement axial des pieux sous sollicitations dynamiques extrêmes*. Édition Revue française de Géotechnique, 150 p.
135. Hudson J.A., and Harrison J.P. (1997). *Engineering rock mechanics an introduction to the principles*. Elsevier, Oxford, 207-21.
136. Hurteau et al. (1980). *Synthèse de commande numérique multivariable*. Presses internationales de l'École Polytechnique de Montréal, 60 p.
137. ISRM (1979). *Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials*. 16, 2, 138-140.
138. ISRM (1981). *Rock Characterization, Testing and Monitoring, ISRM Suggested Methods*. Brown ET (ed.), Pergamon Press Oxford, 211 pages.
139. ISRM (1983). *Commission on Standardization of Laboratory and Field Tests*. Suggested methods for determining the strength of rock materials in triaxial compression: revised version. *J Rock Mech. Sci. Geomech. Abstr.* 20, 283-290.
140. ISRM (1995). *Commission on Squeezing Rocks in Tunnels*. In: Proc. of the Tunnelling in difficult ground. Workshop 8th ICRM, (ed. G. Barla). Tokyo.
141. ISRM (2014). *Suggested methods for determining the creep characteristics of rock*. 47, 275-290.
142. ITASCA (2011). *FLAC<sub>2D</sub>*. Version 5.0 disponible [Itascacg.com].

- 143.ITASCA (2015). *Fast Lagrangian Analysis of Continua FLAC<sub>2D</sub> Version 7.0*.
- 144.ITASCA (2016). *Fast Lagrangian Analysis of Continua FLAC<sub>2D</sub> Version 8.0*.
- 145.ITASCA (2016). *Fast Lagrangian Analysis of Continua FLAC<sub>3D</sub> in 3 dimensions Version 4.0*.
- 146.ITASCA (2016). *Kubrix Geo*. <http://www.itascacg.com/software/kubrix-geo>.
- 147.Japan Society of Civil Engineering (JSCE), (2006). *Standard Specifications for Tunnelling: Shield Tunnel*.
- 148.Jha, A. K. (2010). *Numerical analysis (FEM) of stress and deformation around underground excavations in rock using elasto-plastic*. Tunnelling and Underground Space Technology, Nepal, 150 p.
- 149.Kalos, A. (2014). *Investigation of the nonlinear time-dependent soil behavior*. Ph.D. Thesis, National Technical University of Athens, Greece
- 150.Kawamoto, T., Aydan, O., Akagi, T., et Ito, T. (1991). *Mechanism and evaluation of deformations of tunnels of squeezing ground*. p. 1317.
- 151.Kesler, S. E., (1966). *Geology and ore deposits of the Mémé - Casséus district, Haiti*. Unpublished Ph.D. dissertation, Stanford University, 159 p.
- 152.Kleine, A. (2007). *Modélisation numérique du comportement des ouvrages souterrains par une approche viscoplastique*. Thèse de doctorat, I.N.P.L., École Nationale Supérieure de Géologie de Nancy, Lorraine France, 313 p.
- 153.Ladanyi, B., and Gill, D.E. 1988. *Design of tunnel linings in a creeping rock*. Int. International journal of mining and geological engineering., 6, 113-126.
- 154.Ladanyi, B. (1993). *Time-dependent response of rock around tunnels*. In: Hudson, J. A. (ed.), *Comprehensive Rock Engineering*, Pergamon Press, 2,78-112.
- 155.Laigle, F. et Kolmayer, P. (1998). *Modélisation numérique du comportement à long terme des ouvrages souterrains*. Revue Française de géotechnique, No. 85, pp. 65 – 77.
- 156.Lama, R.D., and Vutukuri, V.S. (1978). *Handbook on Mechanical Properties of Rocks, Vol. III. Trans Tech*.
- 157.Leite, M. H. (2010). *Introduction à la mécanique des roches*. Presses internationales Polytechnique. Montréal, 86 p.
- 158.Lemaître, J. et Chaboche, J. L. (1988). *Mécanique des matériaux solides*. Éditions Dunod, Paris, 544 p.
- 159.Lewis, J. F. et Mann, P. (1991). *An overview of the geologic and tectonic development of Hispaniola, Geological Survey of America*. Special Paper 262.
- 160.Li, H.Z. and Low, B.K., (2010). *Reliability analysis of circular tunnel under hydrostatic stress field*. Computers and Geotechnics 37(1), 50 – 58.
- 161.Li, X.Z., et Shao, Z.S. (2016). *Micro-macro modelling of brittle creep and progressive failure subjected to compressive loading in roc*. J. Environ. Earth Sci., 75, 583.
- 162.Li, Y., et Xia, C. (2000). *Time-dependent tests on intact rocks in uniaxial compression*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 37, 467-475.

163. Lodus, E.V. (1986). *The stressed state and stress relaxation in rocks*. Institute of Mining. Academy of Sciences of the USSR, Leningrad. 2, 3-11.
164. Louca, K. (1989). *Geological Setting and Base and Precious Metal Deposits of Northern Haiti*. United Nations Revolving Fund for Natural Resources Exploration (UNRFNRE). 32 pp.
165. Lowell, J.D., and Guilbert, J.M., (1970). *Lateral and vertical alteration-mineralization zoning in porphyry ore deposits*. Economic Geology, v. 65, p. 373–408.
166. Lowell, J.D. and J.M. Guilbert., (1982). *Lateral and Vertical Alteration -- Mineralization Zoning in Porphyry Ore Deposits*. Econ. Geology 65.4 (1970): 373-408. Republished in its entirety in Hutchison and Ross Benchmark Volumes edited by W.C. Lacy on Exploration Geology.
167. Madejki, (1960). *Phénomènes de relaxation et de fluage en rhéologie non-linéaire*. Éditions de Centre national de la recherche scientifique, Paris.
168. Mahtab, M. A. et al., 1990. *Geomechanics principles in the design of tunnels and caverns in rocks*. 350 p.
169. Malan, D.F., Vogler, U.W., and Drescher, K. (1997). *Time-dependent behaviour of hard rock in deep level gold mines*. J. S. Afr. Inst. Min. Metall., 97, 135-147.
170. Malan, D.F. (1999). *Time-dependent behaviour of deep level tabular excavations in hard rock*. Rock Mech. Rock Eng, 32 (2), 123-155.
171. Malan, D.F. (2002). *Simulating the time-dependent behaviour of excavations in hard rock*. Rock Mech. Rock Eng., 35 (4), 255-254.
172. Malone, D. H. and Harnish, D. E. (1990). *Geology of the Mémé – Casseus – Foucard Area, Southeast Terre Neuve District, Haiti*.
173. Manh, H. T. (2014). *Comportement des tunnels en terrain poussant*. Université Paris.
174. Marien mining compagny S.A., (2011). *Rapport technique de prospection de Terre Neuve et de Savane Longue*. 24 p.
175. Martin, C.D. 1997. *Seventeenth Canadian Geotechnical Colloquium: The effect of cohesion loss and stress path on brittle rock strength*. Can. Geotech. J., 34 (5), 698-725.
176. Mazarin Inc., (1997). *Rapport technique de prospection de Terre Neuve*. 300 p.
177. McCann, W. R. (2006). *Estimating the threat of tsunamogenic earthquakes and earthquake induced-landslide tsunami in the Caribbean*. Paper presented at NSF Caribbean Tsunami Workshop, World Scientific, San Juan, Puerto Rico.
178. Mitchell, AHG et Garson, MS (1981) *Dépôts minéraux et paramètres tectoniques mondiaux*. Academic Press geology Londres, 405 p.
179. Matsuki, K., Nakama, S et Sato, T. (2009). *Estimation of regional stress by FEM for a heterogeneous rock mass with a large fault*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science.
180. Mauffret, A., Leroy, S., 1997. *Seismic stratigraphy and structure of the Caribbean igneous province*. Tectonophysics 283 (1), 61–104.

181. Mauffret, A., Leroy, S., 1999. *Neogene intraplate deformation of the Caribbean plate at The Beata Ridge*. *Sediment. Basins World* 4, 627–669.
182. Mauffret, A., Leroy, S., d'Acremont, É., Maillard, A., Mercier de Lépinay, B., Dos Reis, A.T., Miller, N., Necessian, A., Pérez-Vega, R., Perez, D. (2001). *Une coupe de la province volcanique Caraïbe: premiers résultats de la campagne sismique Casis 2*. *Comptes-Rendus de l'Académie des Sciences-Series IIA-Earth and Planetary Science* 333 (10), 659–667.
183. Mercier-Langevin, F., et Hadjigeorgiou, J. (2011). *Towards a better understanding of squeezing potential in hard rock mines*. *Mining Technology*, 120(1), 36-44.
184. Mirza, U.A. (1978). *Investigation into the design criteria for underground openings in rocks which exhibit rheological behaviour*. Ph.D. Thesis, University of Newcastle-upon-Tyne, UK.
185. Montès, P. (2012). *Facteurs de sécurité dans le cas de matériaux obéissant au critère de Coulomb*. En ligne.  
<http://jfjpm-genie-civil.blogspot.com/2012/06/equations-explicites-de-deux-facteurs.html>.
186. Montès, P. (2013). *État de contraintes tridimensionnel en un point*. En ligne.  
<http://jfjpm-genie-civil.blogspot.com/2013/08/resistance-des-materiaux-premiere.html>.
187. Newton, I. (1687). *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica (mathematical principles of natural philosophy)*. London.
188. Nickmann, M., Spaun, G., and Thuro, K. (2006). *Engineering geological classification of weak rocks*. In: Proc. of the 10th International IAEG Congress 2006, Nottingham, London.
189. Ogata, K. (1990). *Modern control engineering*. Englewood Cliffs, N. J. : Éditions Prentice Hall, Paris, 980 p.
190. Ostertag (2006). *Commande numérique de modèles non-linéaires*. Éditions Dunod, Paris, 200 p.
191. Ottosen, N. S. (1986). *Visco-elastic-visco-plastic formulas for analysis in rock salt cavities*. *Inter Journal Rock Mech. Min. Struct.. & Geomech Abstr.* Vol. 23. No. 3. 201-212. Great Britain.
192. Panet, M. (1995). *Le calcul des tunnels par la méthode convergence-confinement*. Presses ENPC.
193. Parachkevov R. (1964) et Dimov (1965). *Le fluage des roches et son influence sur la caractéristique du soutènement des excavations horizontales*. Dans Proc. 1er Int. Congr. Roche.
194. Paraskevopoulou C., Vlachopoulos N., Diederichs M., (2012). *Long term behavior and support analysis using numerical modeling*. In Proceedings ARMA 46th US Rock Mechanics Geomechanics Symposium, Chicago.
195. Paraskevopoulou C., Diederichs M. (2013). *A comparison of viscous models under constant strain and constant stress: Implications for tunnel analysis*. Geneva.
196. Paraskevopoulou C., Diederichs M., (2013). *Comportement à long terme dans le tunneling : limitations de l'utilisation des paramètres de fluage*. Department of Geological Sciences and Geological Engineering, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada, 52 p.

- 197.Paraskevopoulou, C. (2016). *Dépendance temporelle des roches et implications associées au tunneling*. Thèse.
- 198.Parry, W., Hedderly-Smith, D., & Bruhn, R. (1991). *Fluide inclusions and hydrothermal alteration on the Dixie valley fault, Nevada*. *J. Geophys. Res.*, 96, 19733–19748.
- 199.Pellet, F., Hajdu, A., Deleruyelle, F. and Bensus, F. (2005). *A visco-plastic model including anisotropic damage for the time-dependent behaviour of rock*. *Int. J. for Num. Anal. Meth. Geomech.*, 29, 941-970.
- 200.Pellet, F.L. (2010). *Large time-dependent convergences in a tunnel excavated in a carboniferous rockmass*. In: Proc. of the 6th Asian Rock Mechanics Symposium, New Delhi, India, No 79.
- 201.Pellet, F. (2018). *Apport de la mécanique des roches fondamentales*. Mines ParisTech, Centre de Géosciences.
- 202.Peng, S.S. 1973. Relaxation and the behaviour of failed rock. *Int. J. Rock Mech Min. Sci. & Geomech.*, 10, 235-246.
- 203.Perzyna, P. (1966). *Fundamental problems in visco-plasticity*. *Advances in applied mechanics*, 9 (2), 243-377
- 204.Philippe Margerès (2015). *La Science des Matériaux pour le GMP : Modèles rhéologiques : traction, cisaillement*.
- 205.Phillips, G., & Powell, R. (1993). *Link between gold provinces*. *Economic Geology*, 88, 1084–1098.
- 206.Phillips, O. (1991). *Flow and reactions in permeable rocks*. Cambridge University Press.
- 207.Piguet, J. P. (1983). *La modélisation en mécanique des terrains et son application à l'exploitation minière*. Thèse de doctorat, I.N.P.L., École Nationale Supérieure de Géologie de Nancy, Lorraine France.
- 208.Piguet J.P. et Wojtkowiak F. (2001). *Affaissements et déformations au-dessus des exploitations minières : mécanismes et évolution dans le temps*. *Les Techniques de l'Industrie Minérale*, n° 10, juin, pp. 10-22.
- 209.Pindell, J., Kennan, L., Stanek, K.P., Maresch, W., Draper, G., (2006). *Foundations of Gulf of Mexico and Caribbean evolution: eight controversies resolved*. *Geol. Acta* 4 (1–2), 303.
- 210.Pindell, J., Maresch, W.V., Martens, U., Stanek, K. (2012). *The Greater Antillean Arc: Early Cretaceous origin and proposed relationship to central American subduction mélanges: implications for models of Caribbean evolution*. *Int. Geol. Rev.* 54 (2), 131–143.
- 211.Pineau J.L. (1976). *Influence de l'eau sur les propriétés physicomécaniques d'un grès*. DEA Génie Géologique et Minier, INPL.
- 212.Podnieks E.R., Chamberlain, P.G., and Thill R.E. (1968). *Environmental Effects on Rock Properties*. In: Proc. of the Tenth Symposium of Rock Mechanics, University of Missouri at Rolla.
- 213.Poisson, P. et Colas (1997). *Projet Haïti / Région Terre-Neuve*. Rapport final de la Société minière Mazarin, Haïti, 150 p.

214. Priest, S. D. (1993). *Discontinuity Analysis for Rock Engineering*. Chapman & Hall, p.473.
215. Pubellier, M., Mauffret, A., Leroy, S., Vila, J.M., Amilcar, H., (2000). *Plate boundary readjustment in oblique convergence: example of the Neogene of Hispaniola, Greater Antilles*. *Tectonics* 19 (4), 630–648.
216. Purwodihardjo, A. (2004). *Modélisation des déformations différées lors du creusement des tunnels*. Thèse de doctorat de l'École Centrale de Lyon, 250 p.
217. Read, R. S. (2004). *Twenty years of excavation response studies at AECL's Underground Research Laboratory*. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 41, pp 1251-1275.
218. Richard, F. (2017). *Vers une détermination guidée pour une identifiabilité du comportement mécanique des matériaux par nanoindentation*. Université Bourgogne Franche-Comté, Besançon France. Thèse, 127 p.
219. Rocscience (2007). *Rock mass strength analysis using the Hoek-Brown failure*. Éditions Rocscience.
220. Rocscience (2015). *Phase2 Version 6.0*. Éditions Rocscience.
221. Rousset, G. (1988). *Comportement Mécanique des Argiles Profondes*. Thèse de doctorat de l'École Nationale des Ponts et Chaussées.
222. Rousset, G., (1989). *Comportement mécanique des argiles et marnes profondes*. Application à la modélisation des ouvrages souterrains, Rapport Conseil scientifique G3S, pp. 213 – 219.
223. Rousset, G. (1990). *Les Sollicitations à Long Terme des Revêtements des Tunnels*. *Revue Française Géotechnique*, n° 53, octobre, pp. 5 – 20.
224. Sakurai, S. (1983). *Tunnels : The Second Freeway, the Pinglin and the New Tienlun Headrace tunnels in Taiwan. Displacement measurements associated with the design of underground openings*. *Proc. Int. Symp. Field Measurements in Geomechanics, Zurich*, 2, 1163-1178.
225. Salamon (1964 ) et Dimov (1965). *Influence du temps sur la stabilité des fouilles horizontales simples*. Dans *Proc. 1er Int. Congr. Rock Mechanics, Lisbonne*, vol. 2, pages 273-278 .
226. Sander, H. et al. (2018). *Rock Physical Controls on Production-induced Compaction in the Groningen Field*.
227. Senseny, P.E. (1983). *Review of Constitutive Laws Used to Describe the Creep of Salt*. *International Journal of Mining Engineering*, 2 (4), 323-340
228. Shrestha G.L. (2005). *Stress Induced Problems in Himalayan Tunnels with Special Reference to Squeezing*. Ph.D. Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Norway.
229. Sibson, R. (1987). *Earthquake rupturing as a mineralizing agent in hydrothermal systems*. *Geology*, 15, 701–704.
230. Sibson, R., Robert, F., & Poulsen, K. (1988). *High-angle reverse faults, fluid-pressure cycling and mesothermal gold-quartz deposits*. *Geology*, 16, 551–555.
231. SIMECSOL (1996). *Essais au vérin plat dans le béton projeté du soutènement*.
232. SIMECSOL (1997). *Estimation de la loi de convergence*.

233. Simms, M., & Garven, G. (2004). *Thermal convection in faulted extensional sedimentary basins : theoretical results from finite-element modeling*. *Geofluids*, 4, 109–130.
234. Singh, B., Jethwa, J. L. et Dube, A. K. (1992). *Correlation between observed support pressure and rock mass quality*. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 7(1), 59- 74. doi:[http://dx.doi.org/10.1016/0886-7798\(92\)90114-W](http://dx.doi.org/10.1016/0886-7798(92)90114-W).
235. Singh, M., Singh, B., et Choudhari, J., (2007). *Critical strain and squeezing of rock mass in tunnels*. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 22(3), 343-350.
236. Smith, B., Bonneville, A., & Hamzaoui, R. (1991). *Flow duration of a dike constrained by paleomagnetic data*. *Geophys. J. Int.*, 106, 621–634.
237. Sobotka, Z. (1962). *Quelques problèmes de rhéologie non linéaire*. Le Symposium international de l'IUTAM sur les effets du second ordre dans la plasticité d'élasticité et la dynamique des fluides, Haifa.
238. Sodemine (2018). *Synthèse des travaux de prospection et de reconnaissance*. Mine Sedren / Terre Neuve. Rapport N° C96-64719.0.
239. Song; Yang; Jiang et Zhang (2016). *Experimental investigation and numerical simulation of surrounding rock creep for deep mining tunnels*. *Journal of the Southern African institute of mining and metallurgy*, Vol. 116 no. 12, Johannesburg. [http://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2225-62532016001200015](http://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2225-62532016001200015).
240. Stacey et Page (1986). *Practical Handbook for underground rock mechanics*. Trans Tech publications, Germany, 145 p.
241. Stuwe, K. (1998). *Tectonic constraints on the timing relationships of metamorphism, fluid production and gold-bearing quartz vein emplacement*. *Ore Geology Reviews*, 13, 219–228.
242. Stuwe, K., Will, T., & Zhou, S. (1993). *On the timing relationship between fluid production and metamorphic piles : some implications for the origin of postmetamorphic gold mineralisation*. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 310, 417–430.
243. Sulem, J. (1983), *Comportement différé des galeries profondes*. Thèse de doctorat. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
244. Sulem, J., Panet, M., et Guenot, A. (1987). *An analytical solution for time-dependent displacements in a circular tunnel*. *Journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts* (vol. 24, p. 155-164).
245. Saint-Venant, A. J. C.B. (1855). *Mémoire sur la Torsion des Prismes*, *Mem. Divers Savants*, 14, pp. 233–560.
246. Systèmes, D. (2012). Modèles de fluage. <http://help.soliworks.com/2012/french/solidworks/cworks/creepmodels.html>.
247. Talobre, J. (1967). *La mécanique des roches et ses applications*. Infoscience, Paris, Dunod.
248. Terrier M., Bialkowski A. (2013). *Microzonage sismique de Port-au-Prince (Haïti): étude géologique*. BRGM/RP-61243-FR Report, p.91, fig.49, ann.1.
249. Terrier M., Bialkowski A., Nachbaur A., Prépetit C., Joseph Y.F. (2014). *Revision of the geological context of the Port-au-Prince metropolitan area, Haiti: implications for slope*

- failures and seismic hazard assessment, Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 14, 2577–2587.
250. Terrier M., Nachbaur A. (2013). *Microzonage sismique de Port-au-Prince (Haïti): Carte de l'aléa mouvements de terrain*. Rapport BRGM/RC-62440-FR, 91 p., 32 fig., 1 ann.
251. Terrier, M. et al. (2015). *Apport des images Pléiades au microzonage sismique de Port-au-Prince (Haïti) : application à l'étude géologique*. Article in revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection.
252. Terzaghi, R. et Voigt, B. (1979). *Karl Terzaghi on rockslides: the perspective of a halfcentury In Rockslides and Avalanches*. Éditions B. Voigt), Part 2, 111-131. New York: Elsevier.
253. Thomas, M. et al. (2017). *Simulation des vibrations mécaniques*. Presses de l'Université du Québec, Montréal, 700 p.
254. Thompson, A. J. B., et Thompson, J. F. H. (1996). *Atlas of Alteration, A Field Guide to Hydrothermal Alteration Minerals*. Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division.
255. Thoraval A. (1997). *Evaluation des effets de surface dus aux galeries creusées à très faible profondeur dans les Grès Vosgiens*. Rapport INERIS non public. Réf. SSE-ATH/Dmi 97-26 EF 43/RN01, avril.
256. Tomanovic, Z. (2006). *Modèle rhéologique du fluage des roches tendres basé sur les tests sur marnes*. *Mech. Time-Dependent Mater.*, 10 (2) ( 2006 ), pp. 135-154.
257. Tresca, H. (1864). *Mémoire sur l'écoulement des corps solides soumis à de fortes pressions*. *CR Acad. Sci. Paris*, vol. 59, p. 754.
258. Tritsch, J.-J. et al. (2005). *Analyse critique de quelques méthodes analytiques*. [<https://hal.archives-ouvertes.fr/ineris-00976161/document> [cité le 10 août 2016]].
259. Von Mises, R. (1913). "*Mechanik der festen Körper im plastisch-deformablen Zustand*". *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen*. Mathematisch-Physikalische Klasse. **1913**(1): 582-592.
260. Weaver, S.H. (1936). Creep curve of steel. *Trans Amer Soc. Mech. Eng.*, LVIII, 745-51.
261. Weertman, J. (1979). *Lois de fluage pour le manteau de la Terre*. Article lié à la revue de géophysique, Bibliothèque en ligne Wiley.
262. Weishen, Z. et al. (2004). *Stability analysis and modelling of underground excavations in fractured rocks*. Elsevier, 288 p.
263. Woodring, W. P., Brown, J. S., et Burbank, W. S. (1924). *Geology of the Republic of Haiti*. Department of Public Works, Port-au-Prince.
264. Yang, J., Large, R., & Bull, S. (2004). *Factors controlling free thermal convection in faults in sedimentary basins : implications for the formation of zinc-lead mineral deposits*. *Geofluids*, 4, 237–247.
265. Zhao, C., Hobbs, B., Mulhaus, H., Ord, A., & Lin, G. (2003). *Convective instability of 3-d fluide saturated geological fault zones heated from below*. *Geophys. J. Int.*, 155, 213–220.
266. Zhao, C., Hobbs, B., Ord, A., Peng, S., Mulhaus, H., & Liu, L. (2004). *Theoretical investigation of convective instability in inclined and fluid-saturated three-dimensional fault zones*. *Tectonophysics*, 387, 47–64.

267. Zhao, C., Lin, G., Hobbs, B., Ord, A., Wang, Y., & Mulhaus, H. (2003). *Effects of hot intrusions on pore-fluid flow and heat transfer in fluid-saturated rocks*. *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg*, 192, 2007–2030.
268. Zhao, Z., Zheng, Y., Wei, C., & Gong, B. (2004). *Temporal relationship between granite cooling and hydrothermal uranium mineralization at dalongshan in China: a combined radiometric and oxygen isotopic study*. *Ore Geology Reviews*, 25, 221–236.
269. Zhang, L., (2017). *Engineering properties of rocks*. Second edition de Butterworth-Heinemann (BH), Elsevier, 276 p.
270. Zienkiewicz et al. (2000). *The finite elements method*. Edition Zienkiewicz, 2 tomes, 500 p.