

DIMENSIONNEMENT ET GESTION DES RISQUES ET INCERTITUDES EN GÉNIE CIVIL

Jason Messerli, Msc. Bauing. ETH Zürich
Chef de Groupe Travaux Souterrains CH-D
WSP Ingenieure und Planer AG, Bern



que signifie l'incertitude?



= état de **défaut d'information**
concernant la compréhension ou la **connaissance d'un événement**,
de ses **conséquences**
ou de sa **fréquence (probabilité)**

... et un risque?



= événement avec une certaine conséquence et fréquence (probabilité)

risque = fréquence x conséquence

gestion des incertitudes en GC

La gestion des incertitudes est cruciale pour assurer:
la sécurité, la qualité et la durabilité des projets.

- **Identifier les sources d'incertitudes** : matériaux utilisés, conditions géotechniques/géologie/hydrologie, conditions environnementales, géométrie et topologie, anthropologique (fondations, galeries, conduits)
- **dimensionnement robuste** : La conception doit être suffisamment **flexible** pour s'adapter aux incertitudes résiduelles => analyse de sensibilité
- **évaluer les risques associés aux incertitudes** et détermination des mesures de mitigation
- **suivi et ajustement** : Tout au long du projet, il est crucial de surveiller les incertitudes et d'ajuster les stratégies de gestion des risques

incertitudes des matériaux utilisés



acier: propriétés mécaniques uniformes, corrosion, soudures.

Facteur de sécurité: $\gamma = 1.05/1.15$ (SIA 262/263)



béton: variabilité dans la qualité des composants, production et conditions de cure, résistance à long terme.

Facteur de sécurité: $\gamma_c = 1.50$ (SIA 262)



bois: variabilité naturelle, humidité, dégradation biologique, connexions.

Facteur de sécurité: $\gamma = 1.50 - 1.75$ (SIA 265)

incertitudes des matériaux utilisés

Acier

Aciers de construction

4.1.3

Les facteurs de résistance sont normalement:

$\gamma_{M1} = 1,05$ pour la vérification de la résistance et de la stabilité

$\gamma_{M2} = 1,25$ pour les moyens d'assemblage et la vérification de la section nette.

2.3.2.5

La valeur de calcul de la limite d'écoulement de l'acier d'armature passive est donnée par:

$$f_{sd} = \frac{f_{sk}}{\gamma_s}$$

$$\gamma_s = 1,15$$

incertitudes des matériaux utilisés

Bois

Tableau 6: Propriétés caractéristiques et valeurs de calcul du bois massif ($\eta_w = 1,0$ et $\eta_t = 1,0$)

Classes de résistance		Résineux			Chêne Hêtre	
		C16	C24	C30	D30	
Propriétés caractéristiques ¹⁾						
– Résistance à la flexion	$f_{m,k}$	N/mm ²	16	24	30	30
– Module d'élasticité moyen en flexion	$E_{m,mean}$	N/mm ²	8 000	11 000	12 000	10 000
– Densité	ρ_k	kg/m ³	310	350	380	530
Valeurs de calcul ¹⁾						/ 1.71
Résistance	Flexion	$f_{m,d}$	N/mm ²	9,5	14	17,5
	Traction au fil	$f_{t,0,d}$	N/mm ²	5,5 ²⁾	8	10,5
	Compression au fil	$f_{c,0,d}$	N/mm ²	9,5	12	13,5
	Traction ⊥ au fil	$f_{t,90,d}$	N/mm ²	0,1	0,1	0,1
	Compression ⊥ au fil	$f_{c,90,d}$	N/mm ²			
	– en général		N/mm ²	1,5	1,8	2,0
	– avec un avant-bois ^{3) 4)}		N/mm ²	2,0 (2,6)	2,3 (2,9)	2,7 (3,3)
	– appui d'extrémité ⁴⁾		N/mm ²	1,5 (2,6)	1,8 (2,9)	2,0 (3,3)
Rigidité	Contrainte de cisaillement ⁶⁾	$f_{v,d}$	N/mm ²	1,5	1,5	1,5
	$E_{0,mean} \parallel$ au fil ⁵⁾	$\left\{ \begin{array}{l} E_{m,mean} \\ E_{t,0,mean} \\ E_{c,0,mean} \end{array} \right\}$	N/mm ²	8 000	11 000	12 000
	$E_{90,mean} \perp$ au fil ⁵⁾	$\left\{ \begin{array}{l} E_{t,90,mean} \\ E_{c,90,mean} \end{array} \right\}$	N/mm ²	270	300	300
Module de cisaillement ⁵⁾		G_{mean}	N/mm ²	500	500	500
						1 000

incertitudes des matériaux utilisés

Bois

Moins
d'incertitude
due au bois
lamellé

=>
homogénéisation
des propriétés

Tableau 7: Propriétés caractéristiques et valeurs de calcul pour le bois lamellé collé de résineux
(pour $\eta_w = 1,0$ et $\eta_t = 1,0$)

Classes de résistance		BLC normal				BLC haute qualité ⁵⁾			
		GL24k	GL24h	GL28k	GL28h	GL32k	GL32h	GL36k	GL36h
Propriétés caractéristiques ¹⁾									
– Résistance à la flexion	$f_{m,k}$	N/mm ²	24	24	28	28	32	32	36
– Mod. d'élast. moyen en flexion	$E_{m,mean}$	N/mm ²	11 000	11 000	12 000	12 000	13 000	13 000	14 000
Valeurs de calcul ¹⁾									
Résistance	Flexion	$f_{m,d}$	N/mm ²	16	16	18,5	18,5	21	21
	Traction au fil	$f_{t,0,d}$	N/mm ²	10	12	12	14	14	16
	Compression au fil	$f_{c,0,d}$	N/mm ²	13	14,5	16	17	17,5	19
	Traction ⊥ au fil	$f_{t,90,d}$	N/mm ²	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
	Compression ⊥ au fil	$f_{c,90,d}$	N/mm ²	1,9	1,9	2,0	2,0	2,1	2,1
	– en général			2,5 (4,0)	2,5 (4,0)	2,7 (4,3)	2,7 (4,3)	2,8 (4,4)	2,8 (4,4)
	– avec un avant-bois ^{2) 3)}			2,5 (4,0)	2,5 (4,0)	2,7 (4,3)	2,7 (4,3)	2,8 (4,4)	2,8 (4,4)
Rigidité	– appui d'extrémité ³⁾			3,0 (4,7)	3,0 (4,7)	3,0 (4,7)	3,0 (4,7)	3,0 (4,7)	3,0 (4,7)
	Contrainte de cisaillement $f_{v,d}$	N/mm ²	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
	$E_{0,mean}$ au fil ⁴⁾	$\left\{ \begin{array}{l} E_{m,mean} \\ E_{t,0,mean} \\ E_{c,0,mean} \end{array} \right\}$	N/mm ²	11 000	11 000	12 000	12 000	13 000	13 000
	$E_{90,mean}$ ⊥ au fil ⁴⁾	$\left\{ \begin{array}{l} E_{t,90,mean} \\ E_{c,90,mean} \end{array} \right\}$	N/mm ²	300	300	300	300	400	400
Module de cisaillement ⁴⁾		G_{mean}	N/mm ²	500	500	500	500	600	600
Densité ¹⁾		ρ_k	kg/m ³	350	380	380	410	410	430
									450

/ 1.50

incertitudes des matériaux utilisés

Béton neuf (SIA 262)

Tableau 3: Sortes de béton et valeurs caractéristiques des résistances du béton

/ 1.50

Tableau 8: Valeurs de calcul pour le béton de masse volumique normale avec $\eta_t = 1,0$

incertitudes des matériaux utilisés

Béton existant (SIA 269/2)

Résultat minimal et nombre d'essais déterminant (min. 3):
plus d'essais = moins d'incertitudes



Tableau 1: Résistance à la compression des carottes d'un diamètre nominal de 100 mm

Classe de la résistance à la compression	Résultat d'essai le plus bas $f_{ci,min}$ [N/mm ²]	Valeur moyenne de n résultats d'essai $f_{cm(n)}$ [N/mm ²]		
		$n = 3$ à 6	$n = 7$ à 9	$n = 10$ à 14
C8/10	5	16	15	14
C12/15	9	20	19	18
C16/20	13	24	23	22
C20/25	17	28	27	26
C25/30	22	33	32	31
C30/37	27	38	37	36
C35/45	34	45	44	43
C40/50	39	50	49	48

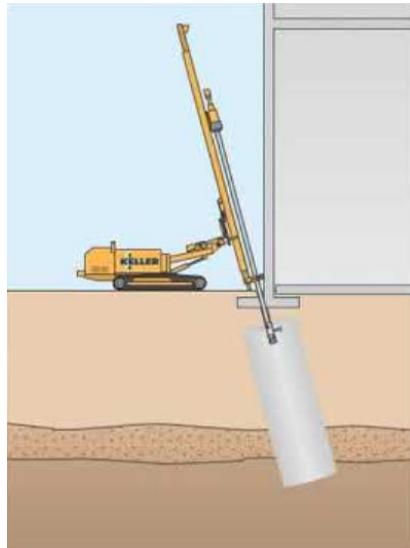
... et de la qualité des essais:

Lorsque la résistance à la compression du béton est déterminée sur des carottes de petites dimensions, soit avec un diamètre et une longueur d'environ 50 mm, on augmentera le nombre d'éprouvettes en fonction du diamètre maximal du granulat D_{max} :

- pour $D_{max} = 32$ mm, le nombre d'éprouvettes est à multiplier par cinq (pour 1 résultat d'essai)
- pour $D_{max} \leq 16$ mm, le nombre d'éprouvettes est à multiplier par trois (pour 1 résultat d'essai).

incertitudes des matériaux utilisés

Jet-grouting (SIA 193.122)



nombre d'essais déterminant :
plus d'essais = moins d'incertitudes

A.3 Pour 4 à 9 échantillons, la résistance à la compression cylindrique uni axiale caractéristique est égale à la valeur minimale.

A.4 Pour 10 échantillons ou plus, la résistance à la compression cylindrique uni axiale caractéristique $f_{m,k}$ peut se calculer comme :

$$f_{m,k} \leq \eta_d \exp(m_y - k_n s_y)$$

où

η_d est un facteur de conversion pour tenir compte des incertitudes non couvertes par d'autres facteurs de sécurité et typiquement égal à 1,0 ;

m_y est la valeur moyenne du logarithme népérien de la résistance des échantillons individuels ;

s_y est l'écart-type du logarithme népérien de la résistance des échantillons individuels ;

k_n est le facteur d'acceptation, typiquement égal à 1,28 pour un matériau de jet-grouting (fractile à 10 %).

... et de la qualité des essais/échantillons:

7.1.10 La détermination de la résistance caractéristique du mélange sol-ciment, qui rentre dans le cadre de la surveillance, du contrôle et des essais, doit s'effectuer en testant des échantillons de préférence de classe de qualité A ou B, comme indiqué dans l'annexe B, prélevés à partir du corps de l'élément de jet-grouting soit par carottage, soit par prélèvement de matériau frais, ou par prélèvement sur les rejets.

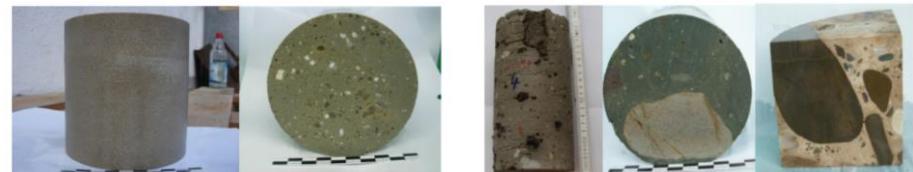


Figure B.1 — Exemple d'échantillon de classe de qualité A



Figure B.3 — Exemple d'échantillon de classe de qualité C



incertitudes des matériaux utilisés

Ancrages (SIA 267)

11.4.3.2.2 La valeur caractéristique $R_{a,k}$ de la résistance ultime externe correspond à la plus petite valeur de R_a tirée d'au moins trois essais d'arrachement exécutés selon le chiffre 10.4.3.2. Si le nombre d'essais est inférieur à trois, on procédera selon le chiffre 11.7.2.8.

La valeur de calcul de la résistance ultime à la traction de l'ancrage est de:

$$R_d = \frac{R_k}{\gamma_M}$$

– Dans le cas d'armatures en acier, le coefficient de résistance de l'ancrage est de:

$$\gamma_M \geq 1,35$$

(68)

– Dans le cas d'armatures en fibres de verre, la valeur sera établie d'après le comportement à la rupture des éléments du tirant et en tenant compte du degré de ductilité. Dans tous les cas:

$$\gamma_M \geq 2,0$$

(69)



incertitudes géotechniques

comment déterminer une valeur caractéristique?



incertitudes géotechniques

Géologie:

- profondeur / contraintes in situ
- présence de formations non reconnues
- incertitude sur la position et la proportion et orientation des différentes formations
- etc.

Géotechnique:

- précision des essais géotechniques
- homogénéité de la distribution statistique
- nombre d'essais statistiquement significatif
- etc.

incertitudes géotechniques

4.2.3

Grandes géotechniques

- 4.2.3.1 La valeur caractéristique X_k d'une grandeur géotechnique correspond à une estimation prudente dans le cadre de la situation de dimensionnement prise en considération, l'écart par rapport à la valeur probable étant admis en fonction de la dispersion et de la fiabilité des valeurs disponibles²⁾.

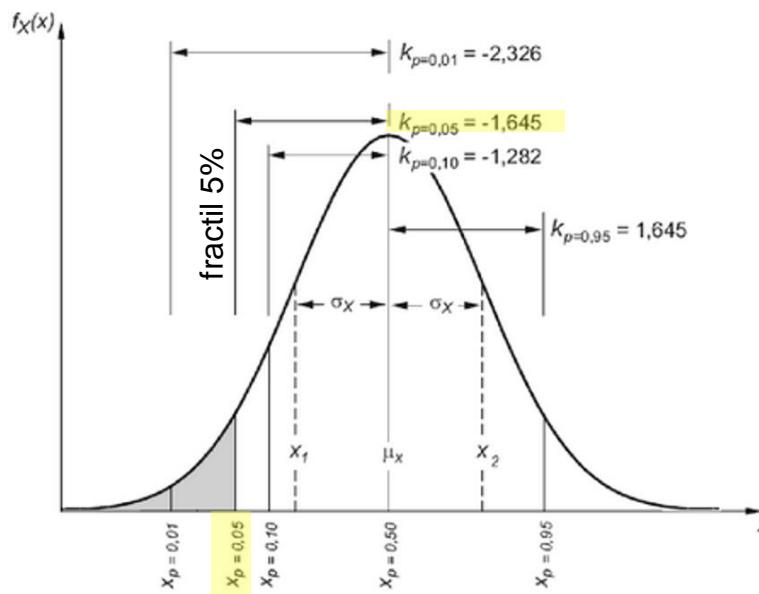


Bild 1-31 Charakteristische Werte einer Normalverteilung

incertitudes géotechniques

Beispiel für die Schätzung des charakteristischen Wertes einer Baugrundgrösse

10 Versuche q_u : 138, 140, 170, 171, 179, 179, 182, 232, 258, 272 [kN/m^2]

Mittelwert \bar{X} : 192 kN/m^2 (moyenne)

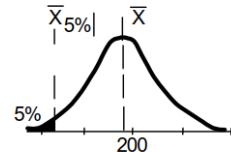
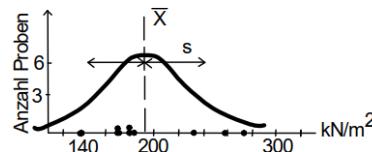
Standardabweichung S : 47 kN/m^2 (écart type)

vorsichtiger Erwartungswert
geschätzt von Ingenieur \bar{X}_k : 170 kN/m^2

5%-Fraktile gemäss Statistik
Normalverteilung X_k :

$$X_k = \bar{X}_{5\%} = \bar{X} - (S/\sqrt{N}) Z_{0.05}$$

$$X_k = 192 - (47/\sqrt{10}) 1.64 = 166 \text{ kN}/\text{m}^2$$



Einführung Norm SIA 267 (2003)

C2 : fx =STABW.S(A1:A10)

A	B	C	D
1	138	X 192	
2	140	S 46	
3	170	N 10	
4	171	X _k 168	
5	179		
6	179		
7	182		
8	232		
9	258		
10	272		

incertitudes géotechniques

In Anbetracht der fehlenden statistischen Basis müssen die charakteristischen Werte abgeschätzt werden. Eine Annäherung beim Vorhandensein von Einzelwerten bietet folgender Ansatz aus dem Merkblatt SIA 2009 ([3.2] und [3.3]):

$$X_k = X_m - \alpha (X_m - X_{extr}) \quad (3.1)$$

X_m Mittelwert der geotechnischen Grösse

X_{extr} Extremwert der Grösse

Die Einzelwerte müssen für die Problemstellung einigermassen repräsentativ sein.

Der Wert α ist in Abhängigkeit der Zuverlässigkeit der Wertbestimmung des Mittel- und Extremwertes zu bestimmen.

$\alpha = 0.20$ bei guter Informationsbasis

$\alpha = 0.40$ bei schlechter Informationsbasis

Einführung Norm SIA 267 (2003)

	A	B	C	D	E
22					
23		138	X 192		
24		140	MIN 138		
25		170	X _k , gut 181		
26		171	X _k , schlecht 170		
27		179			
28		179			
29		182			
30		232			
31		258			
32		272			

Une «bonne information» ($\alpha=0.2$) et aussi dépendant de la variation des résultats (vérification du écart type), en général 5-10 essais sont suffisant
=> engineering jugdement

incertitudes géotechniques

La valeur de dimensionnement X_d d'une grandeur géotechnique est de

$$X_d = \frac{1}{\gamma_m} X_k$$

- 5.3.2.2 Le facteur partiel γ_m tient compte des variations défavorables affectant les propriétés techniques du terrain par rapport à leurs valeurs caractéristiques. Le tableau 1 donne les valeurs du facteur γ_m à introduire dans la vérification de la sécurité structurale.

Tableau 1: Facteur partiel γ_m pour des grandeurs géotechniques

Paramètres du terrain de fondation	γ_e	Facteur partiel γ_m	
		en général	selon le chiffre 5.3.2.3
Charge volumique du sol ou de la roche	γ_e	$\gamma_\gamma = 1,0$	(1,0)
Tangente de l'angle de frottement interne	$\tan\varphi'$	$\gamma_\varphi = 1,2$	(1,1)
Cohésion effective	c'	$\gamma_c = 1,5$	(1,3)
Cohésion apparente	c_u	$\gamma_{cu} = 1,5$	(1,3)
Résistance à la compression uniaxiale	q_u	$\gamma_{qu} = 1,5$	(1,3)

- 5.3.2.3 Les facteurs partiels γ_m du tableau 1 peuvent être réduits dans une certaine mesure si les valeurs caractéristiques X_k sont déterminées par rétro-analyse (selon les indications des chiffres 4.2.3.3 et 4.2.3.4) pour un état en limite d'équilibre (par exemple poinçonnement ou glissement du terrain) ou dans le cas d'une application de la méthode observationnelle. Les valeurs entre parenthèses du tableau 1 sont des valeurs minimales.

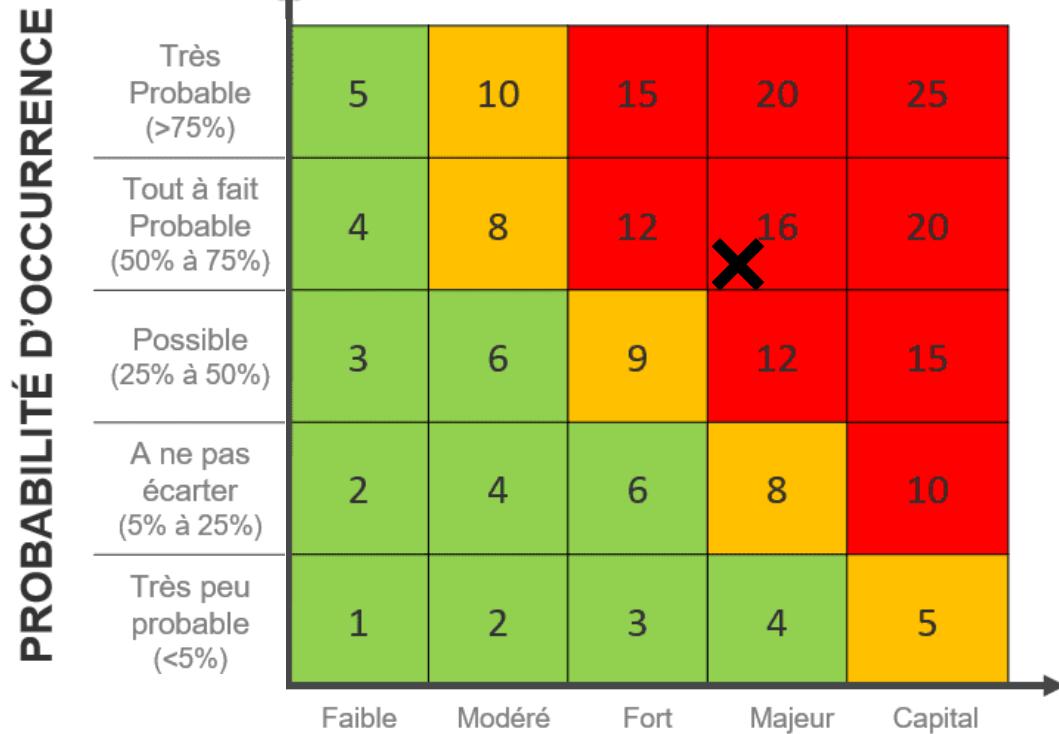
identification, évaluation et mitigation des risques

- identifier et évaluer les risques associés aux incertitudes
 - Comprendre les sources de risque
 - Événements possibles et leurs causes
 - Conséquences et fréquences potentielles
 - Évaluer et classer (acceptable/inacceptable) le risque
- mesures de mitigation – traitement du risque
 - Accepter le risque?
 - Refuser l'activité avec le risque identifié (risque inacceptable)?
 - Éliminer la source (p.ex. réduire l'incertitude avec plus d'essais)
 - Déterminer les mesures pour réduire la fréquence / probabilité
 - Déterminer les mesures pour réduire conséquences
 - Acceptance du client du risque résiduel après mesures

identification, évaluation et mitigation des risques

- Le niveau de risque est le plus important lors des phases d'études préliminaires, qui comprend le plus d'incertitudes:
 - augmenter les connaissances (reconnaissance / essais)
- Transformer les incertitudes en certitudes du risque
- Augmentation successive de la précision de l'information lors des phases suivantes.

identification, évaluation et mitigation des risques



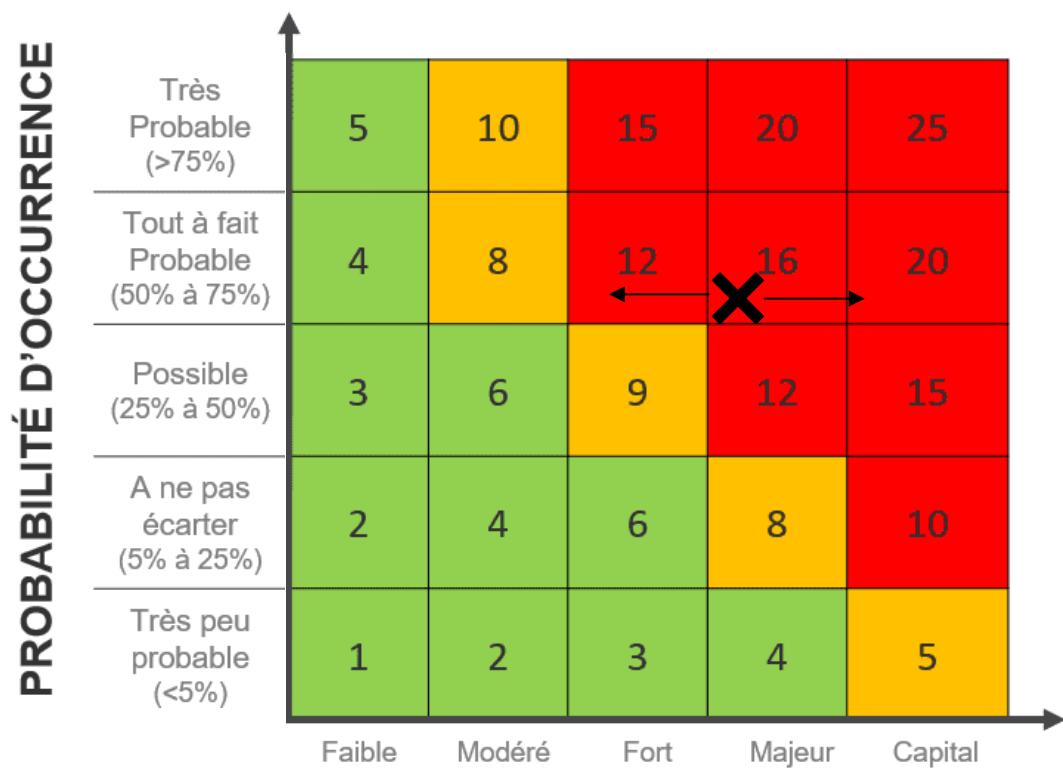
Risque: chutes de pierres

- Risque critique
- Risque important
- Risque acceptable



CONSEQUENCE / GRAVITÉ DE L'IMPACT

identification, évaluation et mitigation des risques



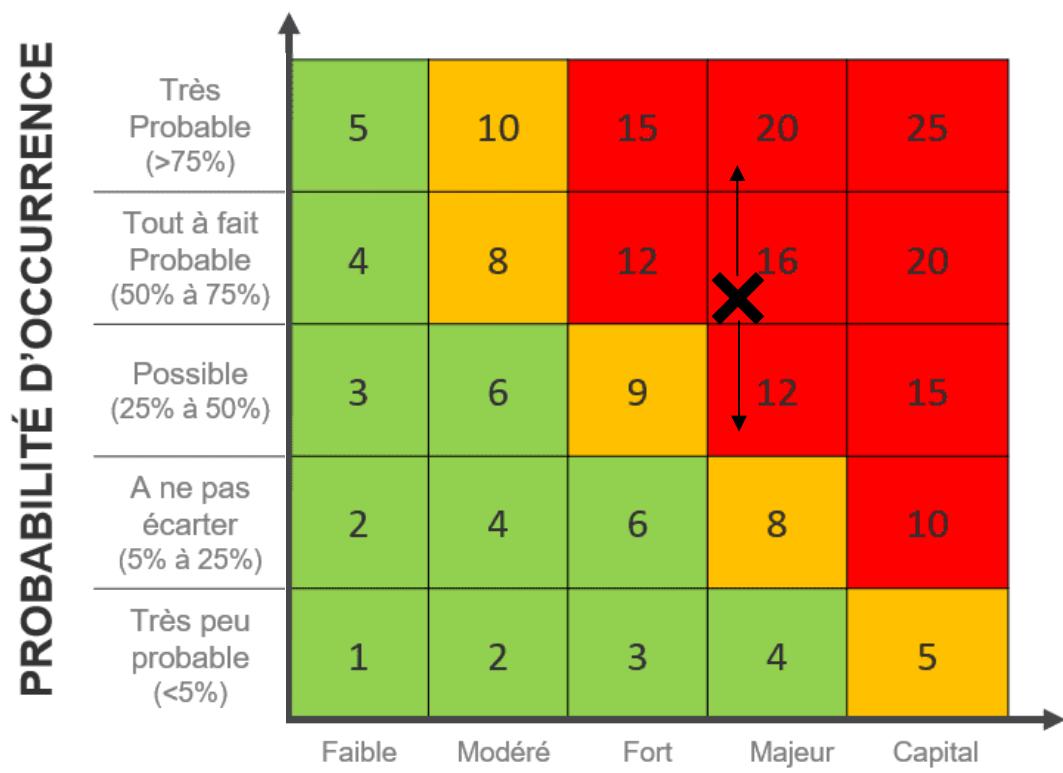
Réduire les incertitudes:
Reconnaisances complémentaires
sur la taille possible des pierres
potentiellement instables

- Risque critique
- Risque important
- Risque acceptable



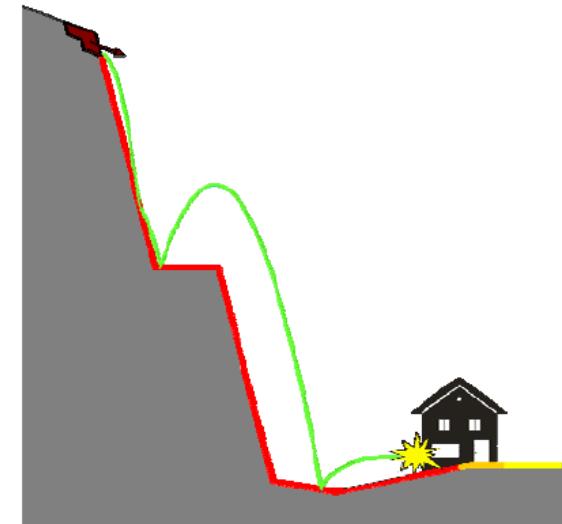
CONSEQUENCE / GRAVITÉ DE L'IMPACT

identification, évaluation et mitigation des risques



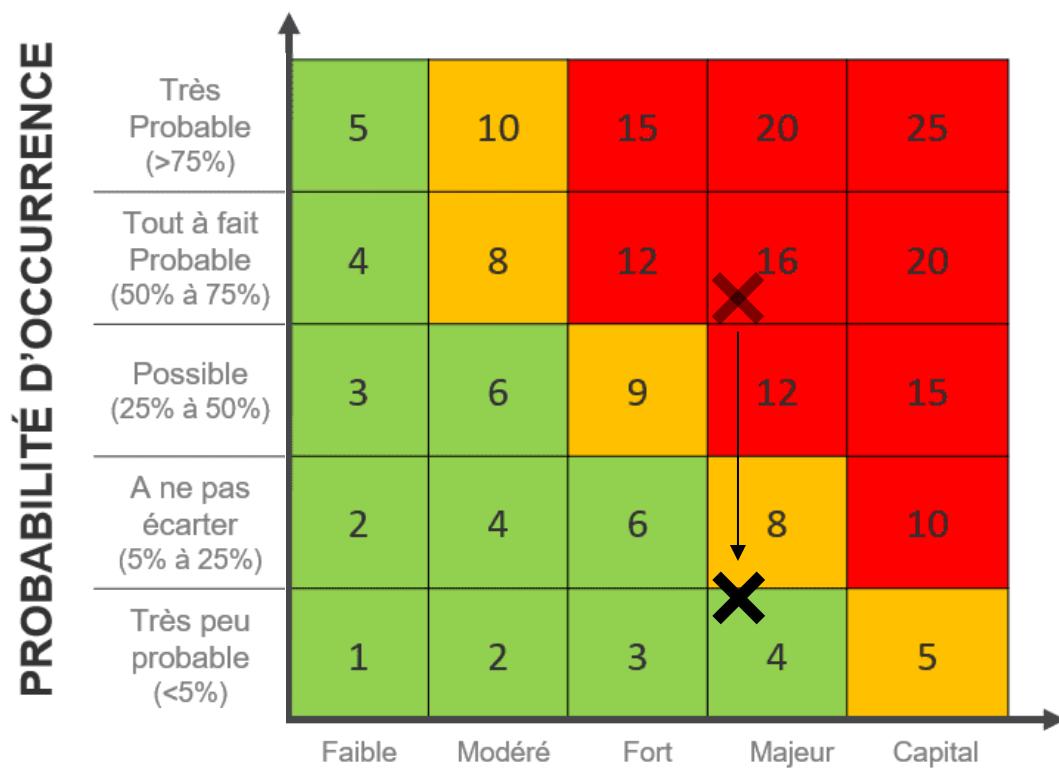
Réduire les incertitudes:
Reconnaisances complémentaires
sur la stabilité des pierres
potentiellement instables

- Risque critique
- Risque important
- Risque acceptable



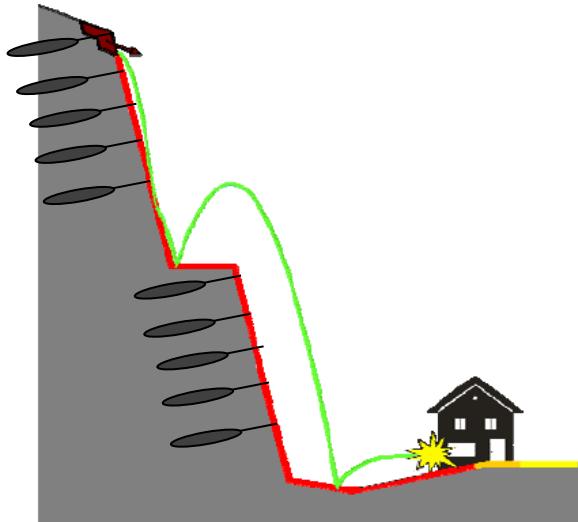
CONSEQUENCE / GRAVITÉ DE L'IMPACT

identification, évaluation et mitigation des risques

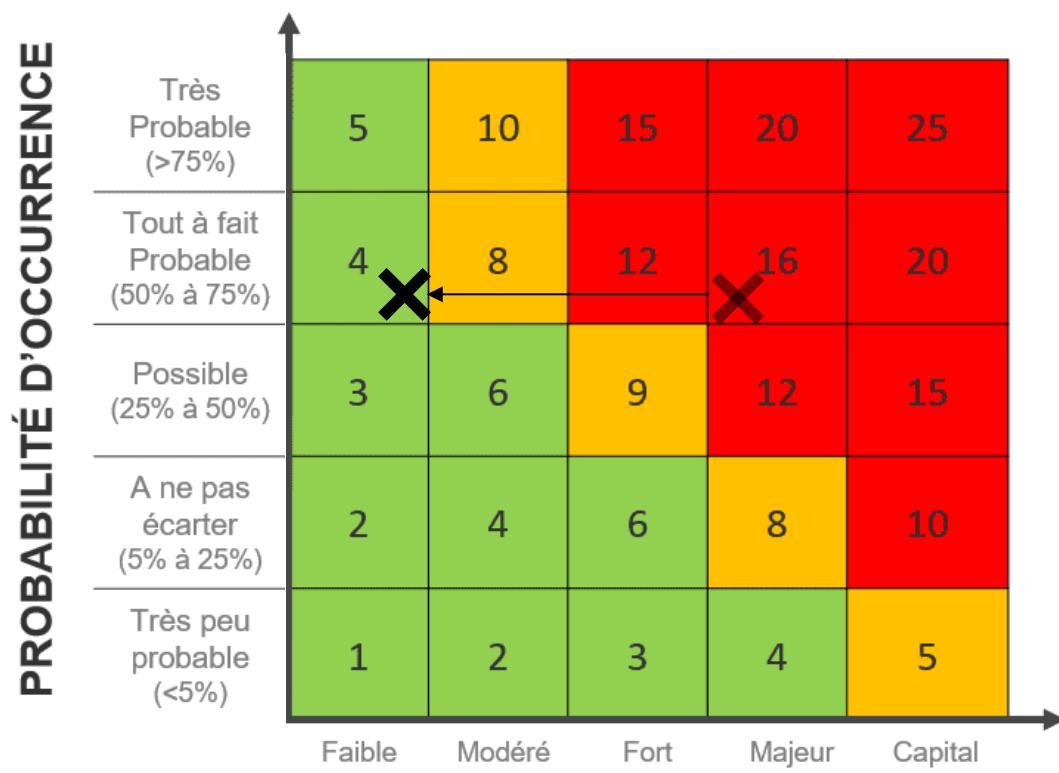


Mesure de mitigation pour réduire la probabilité d'occurrence: ancrages

- Risque critique
- Risque important
- Risque acceptable

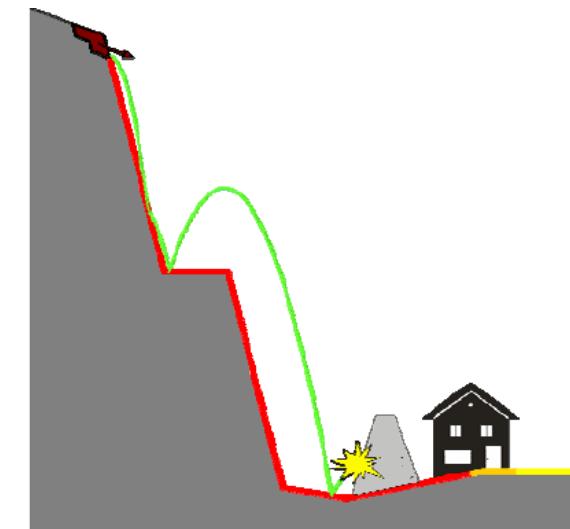


identification, évaluation et mitigation des risques



Mesure de mitigation pour réduire la gravité de l'impact: digue de protection

CONSEQUENCE / GRAVITÉ DE L'IMPACT



Exercice

Sources d'incertitudes en génie civil

1. Prendre individuellement 5 minutes pour lister les sources d'incertitudes dans la pratique de l'ingénieur civil
2. Restituer en commun 10 minutes en constituant des regroupements
3. Discuter les mesures de mitigation liée aux incertitudes

Solution - Sources d'incertitudes (1/4)

(non exhaustif)

Caractéristique du site prévu pour la construction

- Topographie
- Géologie
- Hydrologie
- Géotechnique
- Environnement

Qualité des essais (exécution et interprétation)

- Campagnes de reconnaissance
- Nombre des essais et qualité des échantillons
- Modèles d'interprétation

Nature de l'ouvrage

- Géométrie
- Matériaux
- Mise en place
- Vulnérabilité

Solution - Sources d'incertitudes (2/4)

(non exhaustif)

Modèles de calcul, dimensionnement

- Limites théoriques des modèles
- Approximations
- Erreurs de calcul ou de modélisation
- Expérience (information subjective)
- Qualité des plans

Qualité de l'exécution de l'ouvrage

- Méthode d'exécution
- Qualité des entreprises
- Conditions météorologiques

Solution - Sources d'incertitudes (2/4)

(non exhaustif)

Relations entre acteurs de la construction

- Management de projet
- Bases contractuelles, définition des responsabilités
- Facteurs politiques et légaux
- Facteurs sociaux
- Facteurs économiques
- Influence des médias

Solution - Sources d'incertitudes (4/4)

(non exhaustif)

Mesures de mitigation

- Campagnes de reconnaissance additionnels (réduire les incertitudes)
- Mesures pour réduire la probabilité d'occurrence et/ou la gravité :
 - Eléments de stabilisation
 - Mettre en place une organisation et des moyens pour éviter les erreurs d'interprétation ou de calcul (assurance qualité) → dimension "RH" (recrutement, formation, management...)
 - Processus de suivi (planning, coûts, etc.)
 - Veille réglementaire
 - Etc.
- Mettre en place une gestion des risques de projet avec des mesures concrets et efficaces !