

# Rencontre MOA gestionnaires d'infrastructures et territoires soumis aux risques gravitaires – C2ROP2

Avancement de 2 actions de l'axe Risque (2/2)  
Evaluation des vulnérabilités matérielles et fonctionnelles  
sur les zones bâties – RVUL\_01

*C. Negulescu - BRGM*

Projet de Fin d'étude - Vulnérabilités physiques au phénomène rocheux - effectué au BRGM par: Matéo LACHEUX LEGROUX, Co-Encadré par: M. Bost & A-S. Colas (INSA Lyon), R. Martin (RTM), B. Colas & C. Levy (BRGM), en collaboration avec: F. Bourrier (INRAE), Y. Queffelec, J. Palisse & S. Carlados (ONF)

# Vulnérabilités physiques au phénomène rocheux?



- Dommages engendrés par un aléa « rocheux » (chutes de blocs) sur les bâtiments



# ●○○○ Introduction - Dommages majeurs constatés lors de chutes de blocs

Routes et chemins de fer



Forêts



Bâtiments





# ●○○○ Introduction - Dommages majeurs constatés lors de chutes de blocs

Routes et chemins de fer



Forêts



Bâtiments





# Introduction – Chute de bloc sur un bâtiment

## Bâtiments



## Un bloc est tombé sur ma maison! Que faire?



# Introduction – Chute de bloc sur un bâtiment

## Bâtiments



## Un bloc est tombé sur ma maison! Que faire?

- Se mettre à l'abri





# Introduction – Chute de bloc sur un bâtiment

## Bâtiments



## Un bloc est tombé sur ma maison! Que faire?

- Se mettre à l'abri
- Contacter la mairie et son assurance



# Introduction – Chute de bloc sur un bâtiment

## Bâtiments



## Un bloc est tombé sur ma maison!

- Se mettre à l'abri
- Contacter la mairie et son assurance
- Reconnaissance « Catastrophe naturelle »
  - Appel à experts



# Introduction – Chute de bloc sur un bâtiment

## Un bloc est tombé sur ma maison!

### Bâtiments



- Se mettre à l'abri
- Contacter la mairie et son assurance
- Reconnaissance « Catastrophe naturelle »

Appel à experts





# Introduction – Problématique du stage

**Aléa**  
phénomène naturel



x

**Enjeux & vulnérabilité**  
personnes et biens + ou - vulnérables



= **Risque**



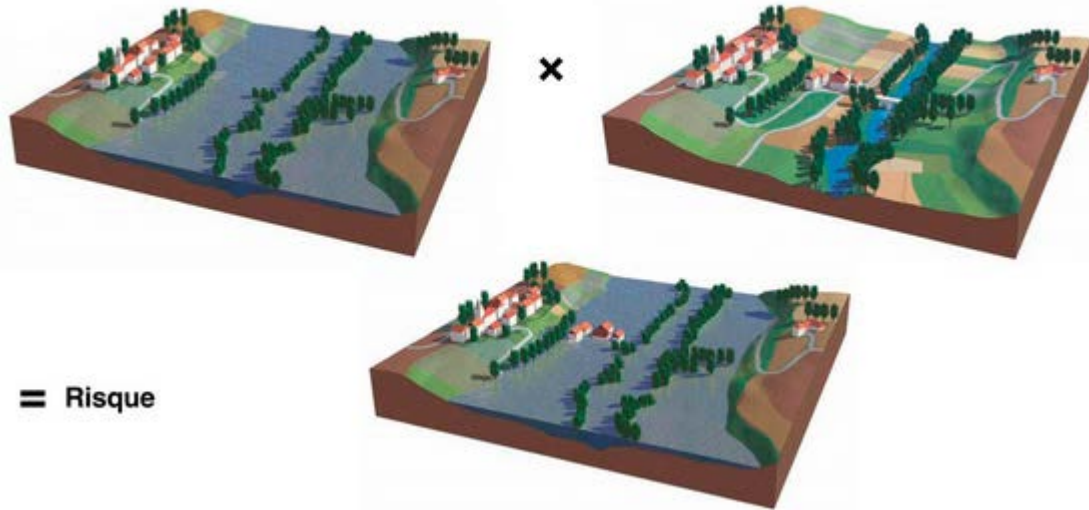
**Un bloc tombe sur ma maison, va-t-elle se casser?**

Ministère de la transition écologique

# Introduction – Problématique du stage

**Aléa**  
phénomène naturel

**Enjeux & vulnérabilité**  
personnes et biens + ou - vulnérables



Un bloc tombe sur ma maison, va-t-elle se casser?

**Quelle est la vulnérabilité physique des bâtiments aux chutes de blocs?**

Ministère de la transition écologique

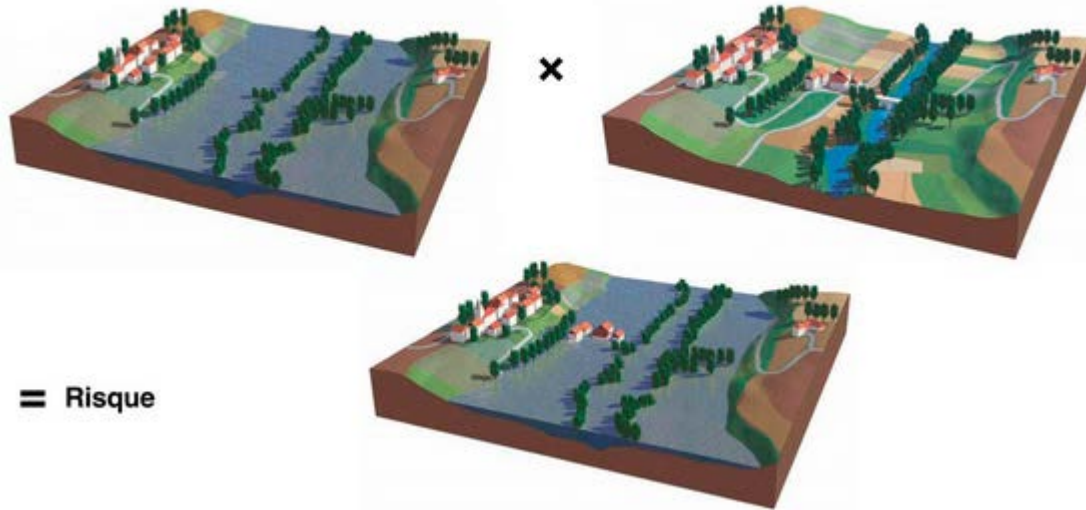




# Introduction – Problématique du stage

**Aléa**  
phénomène naturel

**Enjeux & vulnérabilité**  
personnes et biens + ou - vulnérables



Un bloc tombe sur ma maison, va-t-elle se casser?

**Quelle est la vulnérabilité physique des bâtiments aux chutes de blocs?**

## 3 axes d'études/travail:

- État de l'art des connaissances actuelles
- Création d'une base de données événementielle
- Modélisation de chutes de bloc sur bâtiments

Ministère de la transition écologique

# État de l'art



# État de l'art – différents type de dégâts

Dégâts 1



Dégâts 3



Dégâts 2



Dégâts 4



Dégâts structuraux ou non?

Dégâts 5

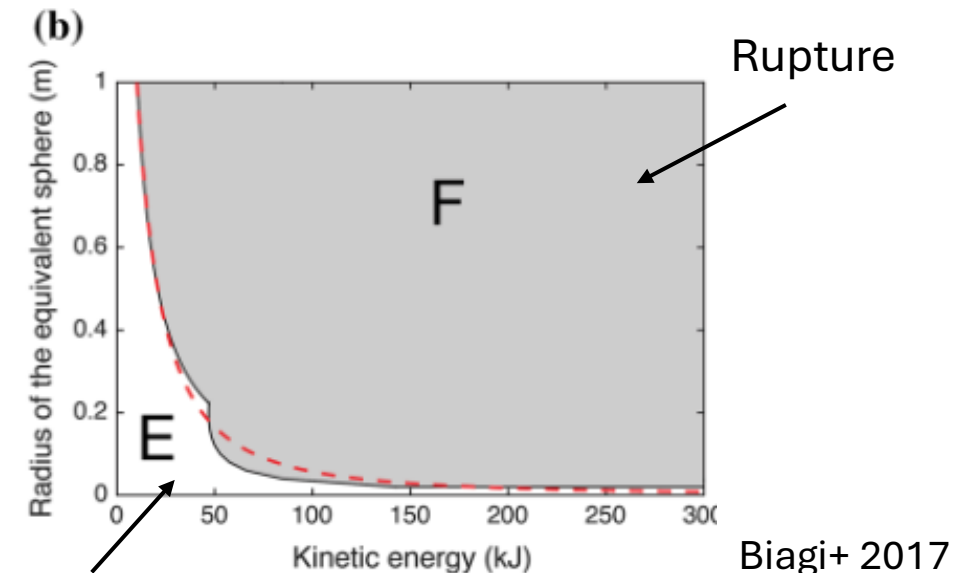




# État de l'art – Variables sur les dégâts

Variables influant sur les dégâts:

- Intrinsèques aux bâtiments
  - Typologie (maçonnerie, bois, béton...)
  - Géométrie du bâtiment
  
- Liées à la chute
  - Lieu d'impact (éléments structurants ou non du bâtiment)
  - Énergie/impulsion de l'impact
  - Obliquité de l'impact
  - Forme du bloc



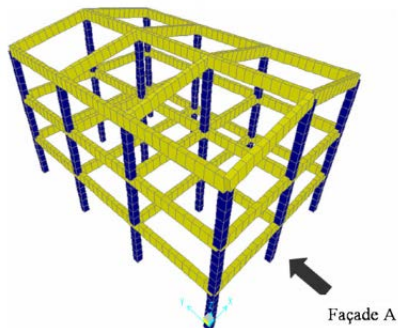
Pas rupture

Courbes de ruptures  
selon le diamètre du  
bloc (maçonnerie)

# État de l'art – Modélisations et dégâts structuraux

## Vulnérabilité bâtiment en béton

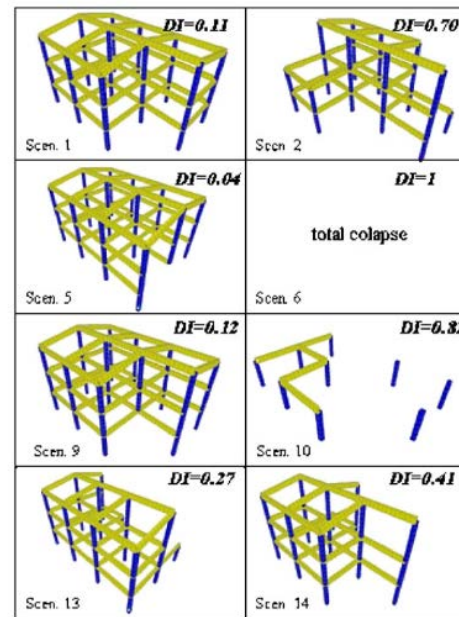
Construction de la structure primaire du bâtiment



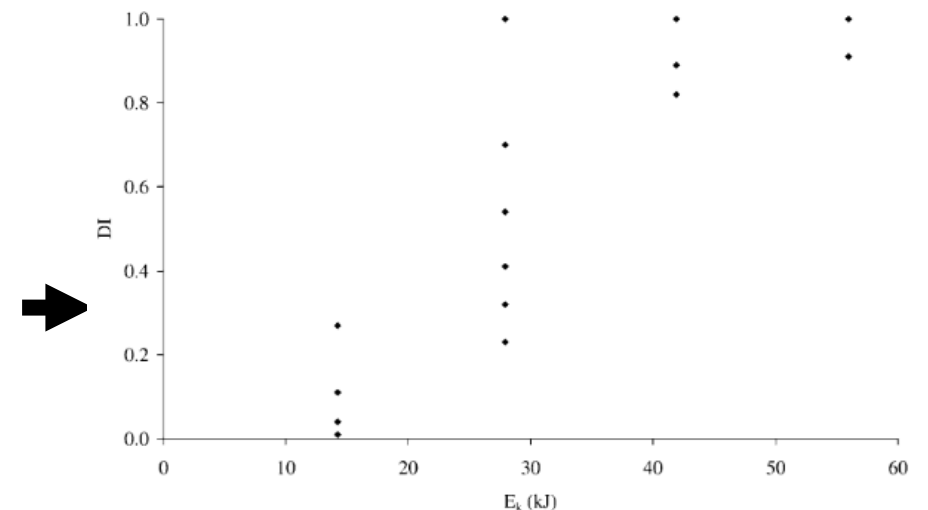
Méthode des éléments finis  
Mavroulli & Corominas  
2010



Estimation des dégâts: destruction d'un élément structural?



Estimation de la vulnérabilité selon l'énergie incidente



Landslides (2010) 7:169–180  
DOI 10.1007/s10346-010-0200-5



# État de l'art – Bases de données existantes

Infos/Nom	Année	Institution/Pays	Type (L, R, B, E)	Lien	Accès direct
Chutes sur rails + route nationale à La Réunion	2014	Ministère de l'Ecologie, du Développement durable, des Transports et du Logement & SNCF / France	R+?	<a href="https://nhess.copernicus.org/articles/14/1953/2014/">https://nhess.copernicus.org/articles/14/1953/2014/</a>	Non
Chutes sur routes + rails	1999	B.C. Ministry of Transportation and Highways (BCMOTH), CP Rail Systems (CP), CN Rail (CN), and BC Rail (BCR) / Canada	R	<a href="https://cdnsiencepub.com/doi/abs/10.1139/t98-106">https://cdnsiencepub.com/doi/abs/10.1139/t98-106</a>	Non
Chutes	2015	Allemagne	L+?	<a href="https://www.researchgate.net/publication/274566343_The_landslide_database_for_Germany_Closing_the_gap_at_national_level">https://www.researchgate.net/publication/274566343_The_landslide_database_for_Germany_Closing_the_gap_at_national_level</a>	Non
C2ROP-INRAE	2020	Alpes	L, R, B	<a href="https://www.geotechnique-journal.org/articles/geotech/abs/2020/02/geotech200012s/geotech200012s.html">https://www.geotechnique-journal.org/articles/geotech/abs/2020/02/geotech200012s/geotech200012s.html</a>	Non
Diverses chutes	2020	Allemagne	R, B	<a href="https://onlinelibrary.wiley.com/action/downloadSupplement?doi=10.1002%2Fesp.4827&amp;file=esp4827-sup-0001-Supplementary+Information.pdf">https://onlinelibrary.wiley.com/action/downloadSupplement?doi=10.1002%2Fesp.4827&amp;file=esp4827-sup-0001-Supplementary+Information.pdf</a>	Oui
Chutes avec fragmentations	2022	Italie	L	<a href="https://doi.org/10.1007/s11069-022-05282-2">https://doi.org/10.1007/s11069-022-05282-2</a> <a href="https://rockbd.upc.edu">https://rockbd.upc.edu</a>	Oui
2011 Christchurch, New Zealand, earthquakes	2017	Nouvelle-Zélande	B	<a href="https://link.springer.com/article/10.1007/s10346-017-0855-2">https://link.springer.com/article/10.1007/s10346-017-0855-2</a>	Oui
Compilation de données de chutes	2020	Geological Survey of Austria / Yosemite rockfall dataset	R, L	<a href="https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013795219322069">https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013795219322069</a>	Non
Rockfall hazard database - Northeastern Region	2017	Ontario - Canada, ministère des transports	?	<a href="https://data.ontario.ca/dataset/activity/rockfall-hazard-database-northeastern-region">https://data.ontario.ca/dataset/activity/rockfall-hazard-database-northeastern-region</a>	Non
Hong Kong rainfall and landslides	1984-2024	Hong Kong	L, R, B?	<a href="https://doi.org/10.1007/s00603-002-0035-z">https://doi.org/10.1007/s00603-002-0035-z</a>	Oui

- Nombreuses de bases de données
- Informations différentes/ données non harmonisées
- Bases de données souvent sur demande
- Beaucoup de catalogues avec la localisation (L), peu avec dégâts sur les routes (R) et bâtiments (B)
- Recensement des cas au niveau national (National geological survey)
- Une base avec dégâts détaillés sur bâtiments (B)





# État de l'art – Évaluation quantitative

Quantitative risk assessment in a rockfall-prone area: the case study of the Crolles municipality (Massif de la Chartreuse, French Alps)

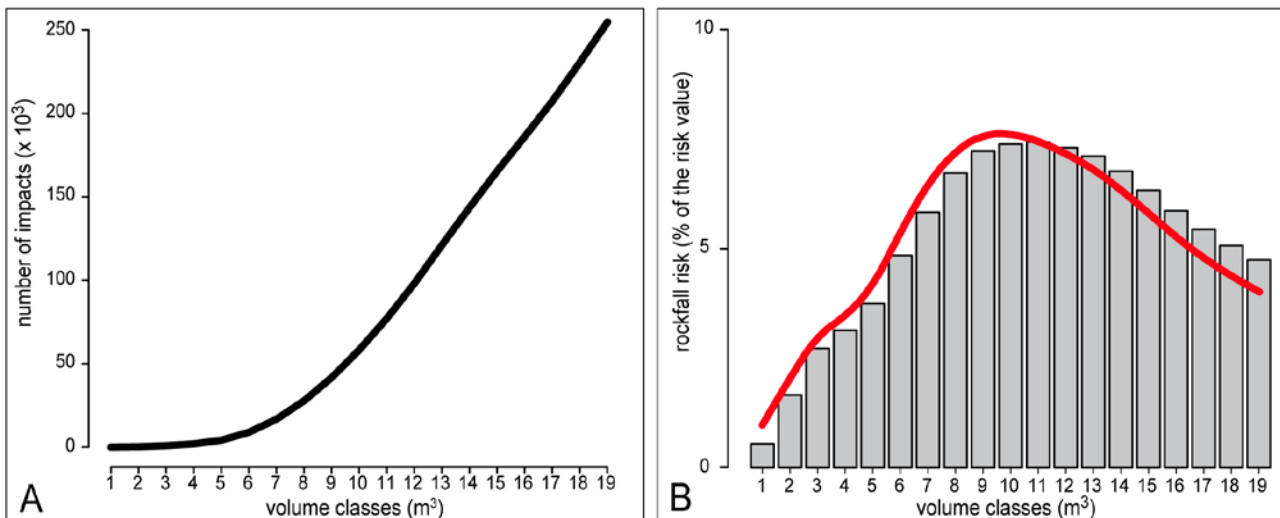
**Évaluation quantitative du risque chutes de blocs: l'exemple de la commune de Crolles (Massif de la Chartreuse, Alpes Françaises)**

Manon Farvacque, Jérôme Lopez-Saez, Christophe Corona, David Toe, Franck Bourrier and Nicolas Eckert, vol. 25 – n° 1 | 2019

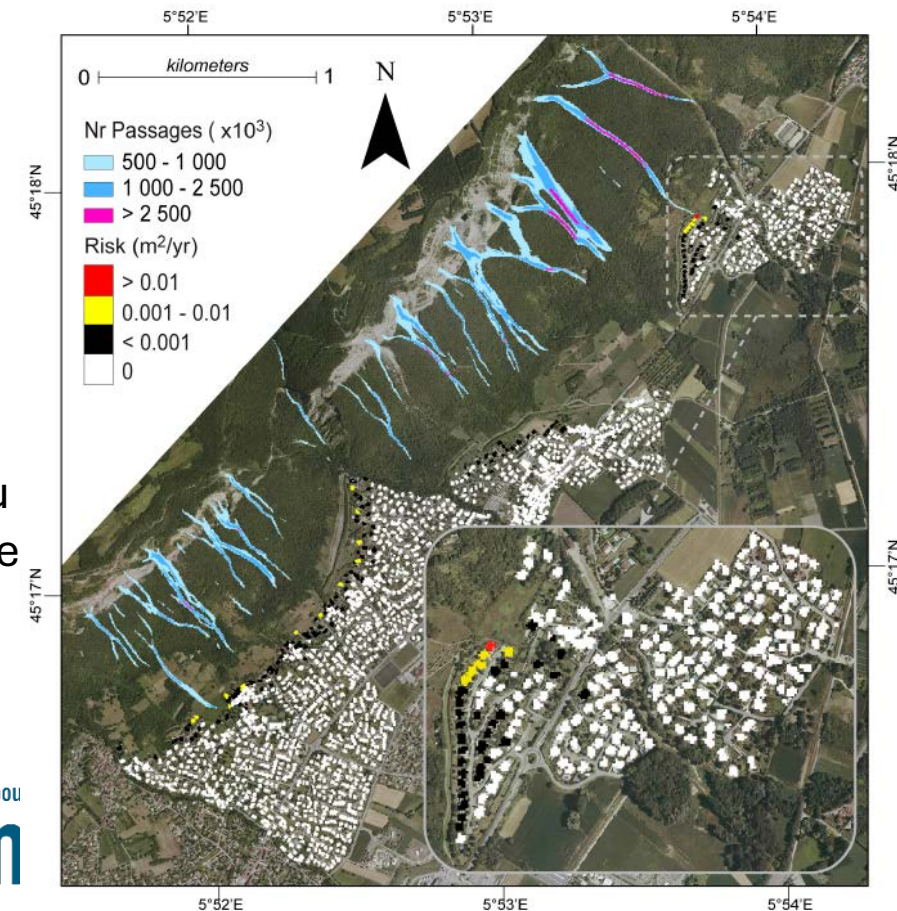
Actes des 19èmes Journées des Jeunes Géomorphologues

A : Distribution du nombre d'impacts pour chaque classe de volume.

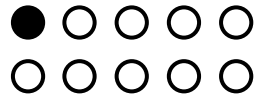
B : Distribution du risque chutes de blocs pour chaque classe de volume



Cartographie du  
risque chutes de  
blocs



# Création d'une base de données événementielle



# Base de données - Source des données



Rapports RTM et BRGM:

- 415 rapports de la RTM (dont anciens rapports BRGM)
- 14 rapports du BRGM

**270** évènements sur 415 utilisés (65%)

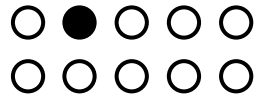
**16** départements

3 grands massifs: Alpes, Vosges, Pyrénées

Rapports début 1900 à 2024







# Base de données – Données types

## Rapport d'expertise

← Fiche évènement




**EVENEMENT**  
Date d'édition : 26/09/2022

---

**Date de l'évènement : 09/02/2018 (EV\_44684)** **P - Chute de blocs**

**Intensité : P3 - Moyen**

**Site de localisation :** territoire communal  
*Brides-les-Bains (73057)*

**Division Domaniale :**

**Descriptions du phénomène**

**Nature du phénomène :**

**Causes du phénomène :**

**Durée du phénomène :**

**Zone de départ :**

**Zone d'arrivée :**

**Actions à mener :**

**Études à engager :**

**Commentaires :**

**Impacts par commune**

Commune impactée	Victimes			Dégâts	Perturbations	Commentaires
	Victimes	Nb Morts	Nb Blessés			
Brides-les-Bains	N	0	0	O	O	-- DEGATS -- Le plus gros bloc a atteint la terrasse d'une maison PERTURBATIONS -- Des petits blocs ont atteints la route départementale

**Témoignages**

Date du témoignage	Source	Commentaire
	RTM	Rapport RTM du 09 02 2018

## Photos





ONF  
Direction territoriale  
Auvergne-Rhône-Alpes



Agence RTM Alpes du Nord  
Service départemental  
RTM de la Savoie

42, quai Charles Roissard,  
73026 Chambéry cedex  
Tél. : 33 (0)4 79 69 96 05  
adél : rtm.chambery@onf.fr

RAPPORT

Réf. : CBI/DJ/270218/2.1.2

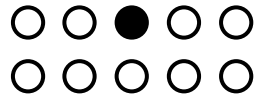
**Objet : Commune de Brides-les Bains. Chute de pierres près du hameau de Fontaine. Compte-rendu de la réunion du 16/02/2018**

*Suite à la réception du rapport du service RTM du 12/02/2018 (visite de terrain du 9/02/2018), la commune a souhaité une réunion d'explication sur le phénomène, mais aussi par rapport aux suites à donner. Cette réunion a eu lieu en mairie le 16/02/2018. Y participaient, M. Briant (Maire), son premier adjoint, MM. Violi des ST de la commune et Jullien du RTM.*

### RAPPEL DU CONTEXTE

Une masse importante de l'ordre d'environ 30 à 50 m<sup>3</sup> s'est détachée du front d'une falaise vers 830 mètres d'altitude. Le plus gros bloc d'un volume d'environ 15 à 20 m<sup>3</sup> (5 m x 4 m x 0.80 m) s'est arrêté vers 580 mètres sur la terrasse d'un bâtiment d'habitation ancien, inoccupé actuellement. Des petits blocs de quelques dizaines de litres sont arrivés au milieu de la route (RD 90d) à l'Ouest des bâtiments.

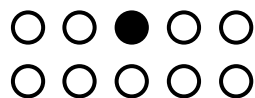




# Base de données – Infos recueillies

22 champs d'informations

Champs	Exemple
Commune	Verel-de-Montbel
Lieu	Lieu-dit le banchet
Localisation GPS	45°33'17"N 5°43'56"E
Département	73
Date	17-févr-15
Heure	5h
Typologie - mur	Maçonnerie
Typologie - toit	
Lieu d'impact	MUR
Taille du bloc (m³)	60
A	3
B	4
C	5
Volume total éboulement (1 à 6)	4
Géologie	Calcaire
Masse (kg)	150000
Forme du bloc	Pavé
Dégâts	5
Différence de hauteur (m)	200
Pente (°)	75
Type de chute	Chute libre - Roulement
Informations supplémentaires	Maçonnerie de 50 cm d'épaisseur ; énergie rotationnelle assez élevée ; Arrachement d'un pan de falaise (90°) puis roulement le long d'une pente plus douce

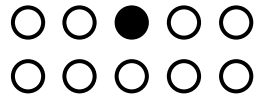


# Base de données – Infos recueillies

Champs	Exemple
<b>Commune</b>	Verel-de-Montbel
<b>Lieu</b>	Lieu-dit le banchet
<b>Localisation GPS</b>	45°33'17"N 5°43'56"E
<b>Département</b>	73
<b>Date</b>	17-févr-15
<b>Heure</b>	5h
<b>Typologie - mur</b>	Maçonnerie
<b>Typologie - toit</b>	
<b>Lieu d'impact</b>	MUR
<b>Taille du bloc (m³)</b>	60
<b>A</b>	3
<b>B</b>	4
<b>C</b>	5
<b>Volume total éboulement (1 à 6)</b>	4
<b>Géologie</b>	Calcaire
<b>Masse (kg)</b>	150000
<b>Forme du bloc</b>	Pavé
<b>Dégâts</b>	5
<b>Différence de hauteur (m)</b>	200
<b>Pente (°)</b>	75
<b>Type de chute</b>	Chute libre - Roulement
<b>Informations supplémentaires</b>	Maçonnerie de 50 cm d'épaisseur ; énergie rotationnelle assez élevée ; Arrachement d'un pan de falaise (90°) puis roulement le long d'une pente plus douce

22 champs d'informations:

- Localisation: Lieu, GPS, Département



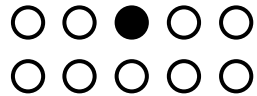
# Base de données – Infos recueillies

Champs	Exemple
Commune	Verel-de-Montbel
Lieu	Lieu-dit le banchet
Localisation GPS	45°33'17"N 5°43'56"E
Département	73
<b>Date</b>	17-févr-15
<b>Heure</b>	5h
Typologie - mur	Maçonnerie
Typologie - toit	
Lieu d'impact	MUR
Taille du bloc (m³)	60
A	3
B	4
C	5
Volume total éboulement (1 à 6)	4
Géologie	Calcaire
Masse (kg)	150000
Forme du bloc	Pavé
Dégâts	5
Différence de hauteur (m)	200
Pente (°)	75
Type de chute	Chute libre - Roulement
Informations supplémentaires	Maçonnerie de 50 cm d'épaisseur ; énergie rotationnelle assez élevée ; Arrachement d'un pan de falaise (90°) puis roulement le long d'une pente plus douce

22 champs d'informations:

- Localisation: Lieu, GPS, Département
- Date et heure



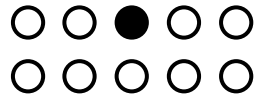


# Base de données – Infos recueillies

Champs	Exemple
Commune	Verel-de-Montbel
Lieu	Lieu-dit le banchet
Localisation GPS	45°33'17"N 5°43'56"E
Département	73
Date	17-févr-15
Heure	5h
Typologie - mur	Maçonnerie
Typologie - toit	
Lieu d'impact	MUR
Taille du bloc (m³)	60
A	3
B	4
C	5
Volume total éboulement (1 à 6)	4
Géologie	Calcaire
Masse (kg)	150000
Forme du bloc	Pavé
Dégâts	5
Différence de hauteur (m)	200
Pente (°)	75
Type de chute	Chute libre - Roulement
Informations supplémentaires	Maçonnerie de 50 cm d'épaisseur ; énergie rotationnelle assez élevée ; Arrachement d'un pan de falaise (90°) puis roulement le long d'une pente plus douce

22 champs d'informations:

- Localisation: Lieu, GPS, Département
- Date et heure
- Informations sur le bâtiment et l'impact



# Base de données – Infos recueillies

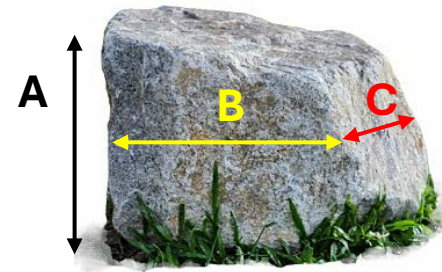
Champs	Exemple
Commune	Verel-de-Montbel
Lieu	Lieu-dit le banchet
Localisation GPS	45°33'17"N 5°43'56"E
Département	73
Date	17-févr-15
Heure	5h
Typologie - mur	Maçonnerie
Typologie - toit	
Lieu d'impact	MUR
<b>Taille du bloc (m<sup>3</sup>)</b>	60
<b>A</b>	3
<b>B</b>	4
<b>C</b>	5
<b>Volume total éboulement (1 à 6)</b>	4
<b>Géologie</b>	Calcaire
<b>Masse (kg)</b>	150000
<b>Forme du bloc</b>	Pavé
Dégâts	5
Différence de hauteur (m)	200
Pente (°)	75
Type de chute	Chute libre - Roulement
Informations supplémentaires	Maçonnerie de 50 cm d'épaisseur ; énergie rotationnelle assez élevée ; Arrachement d'un pan de falaise (90°) puis roulement le long d'une pente plus douce

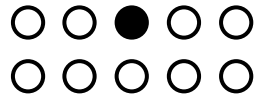
22 champs d'informations:

- Localisation: Lieu, GPS, Département
- Date et heure
- Informations sur le bâtiment et l'impact
- Informations sur le bloc

**Volume total**

1	<1 m <sup>3</sup>
2	1-10 m <sup>3</sup>
3	10-100 m <sup>3</sup>
4	100-10000 m <sup>3</sup>
5	10000 – 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
6	>10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>





# Base de données – Infos recueillies

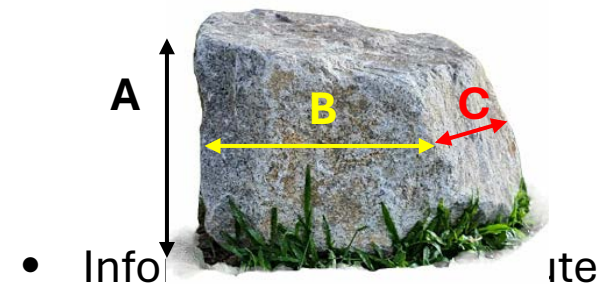
Champs	Exemple
Commune	Verel-de-Montbel
Lieu	Lieu-dit le banchet
Localisation GPS	45°33'17"N 5°43'56"E
Département	73
Date	17-févr-15
Heure	5h
Typologie - mur	Maçonnerie
Typologie - toit	
Lieu d'impact	MUR
Taille du bloc (m <sup>3</sup> )	60
A	3
B	4
C	5
Volume total éboulement (1 à 6)	4
Géologie	Calcaire
Masse (kg)	150000
Forme du bloc	Pavé
Dégâts	5
Différence de hauteur (m)	200
Pente (°)	75
Type de chute	Chute libre - Roulement
Informations supplémentaires	Maçonnerie de 50 cm d'épaisseur ; énergie rotationnelle assez élevée ; Arrachement d'un pan de falaise (90°) puis roulement le long d'une pente plus douce

22 champs d'informations:

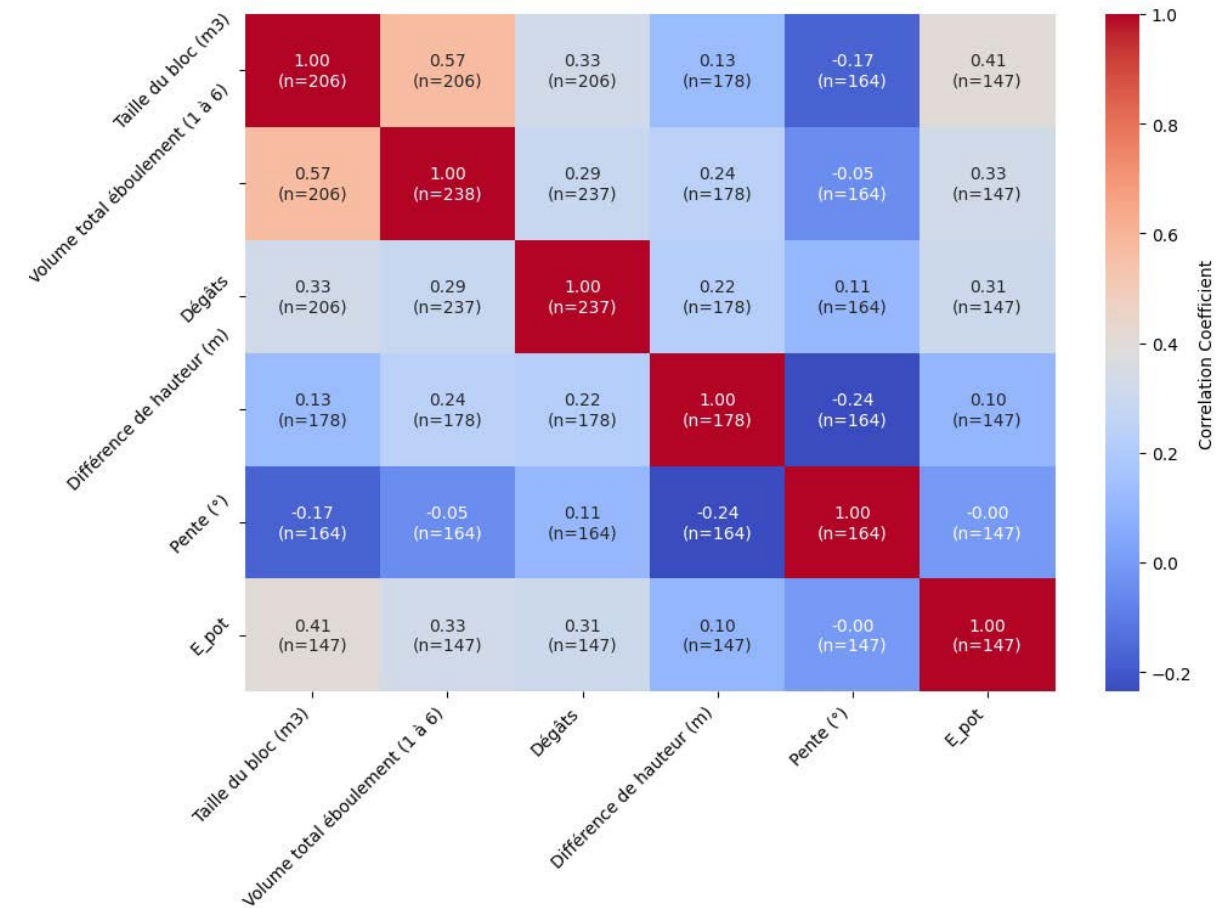
- Localisation: Lieu, GPS, Département
- Date et heure
- Informations sur le bâtiment et l'impact
- Informations sur le bloc

Volume total

1	<1 m <sup>3</sup>
2	1-10 m <sup>3</sup>
3	10-100 m <sup>3</sup>
4	100-10000 m <sup>3</sup>
5	10000 – 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>
6	>10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>



# Base de données – Statistiques : matrice de corrélation

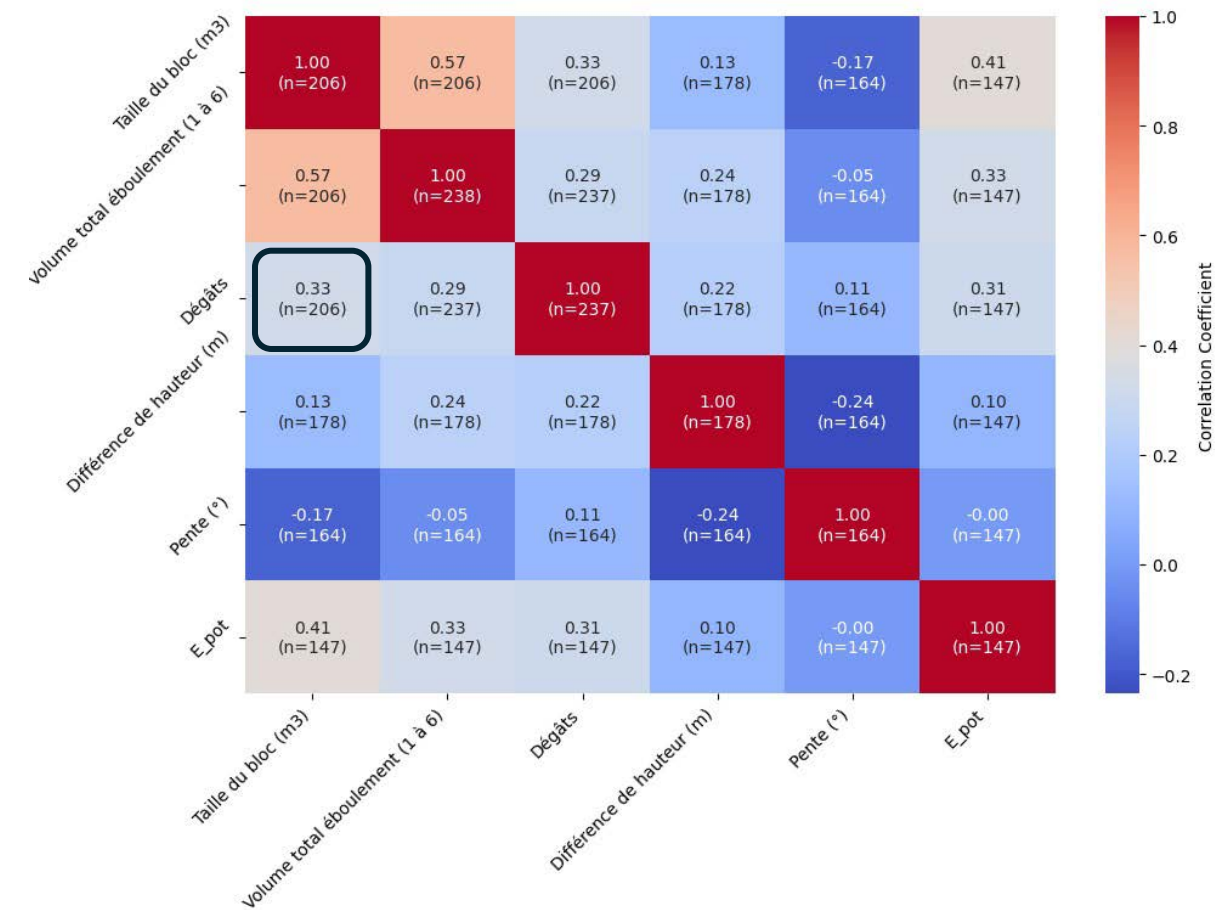


> Peut-on trouver des liens entre les différents champs renseignés?

> Dommages très aléatoires?

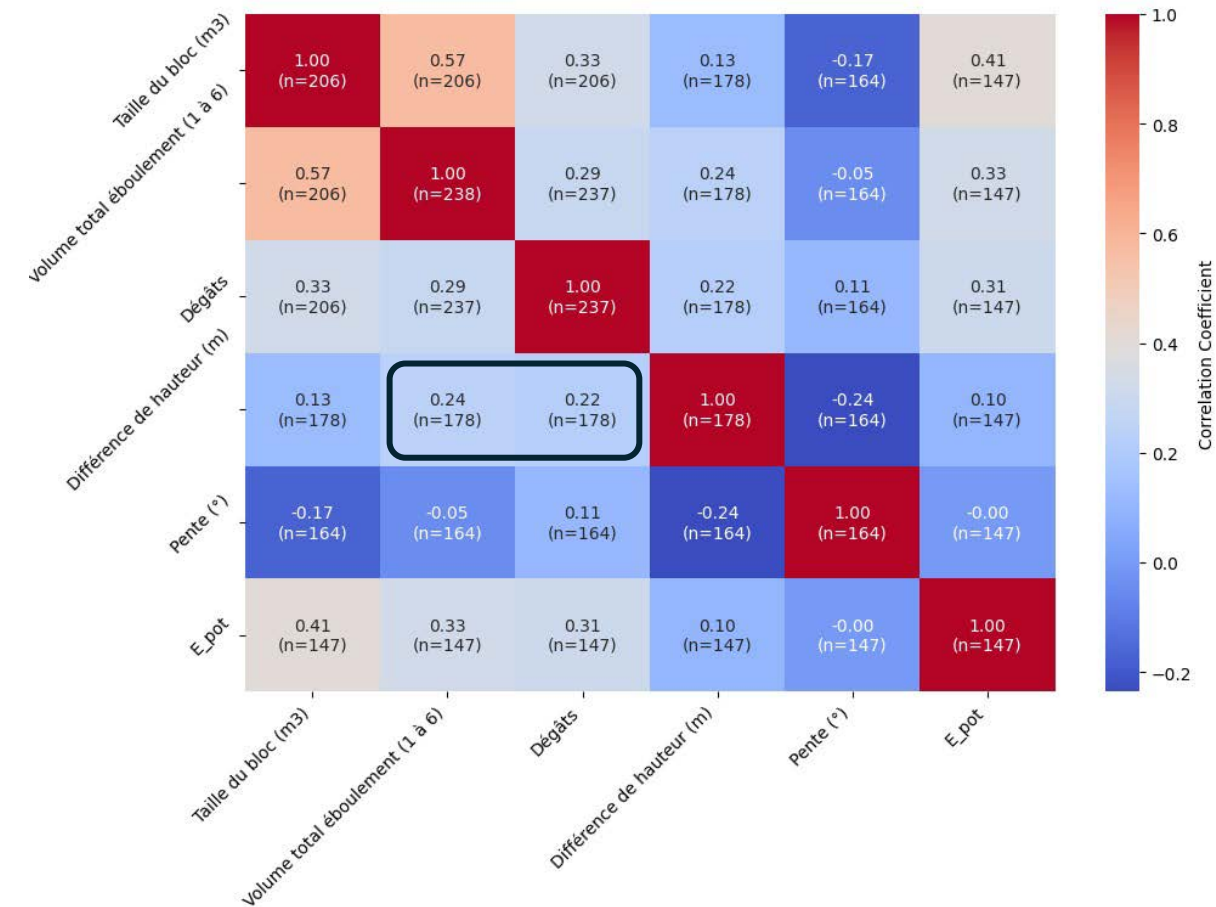


# Base de données – Statistiques : matrice de corrélation

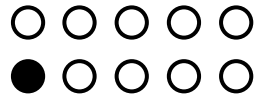


- Corrélation dégâts et taille du bloc

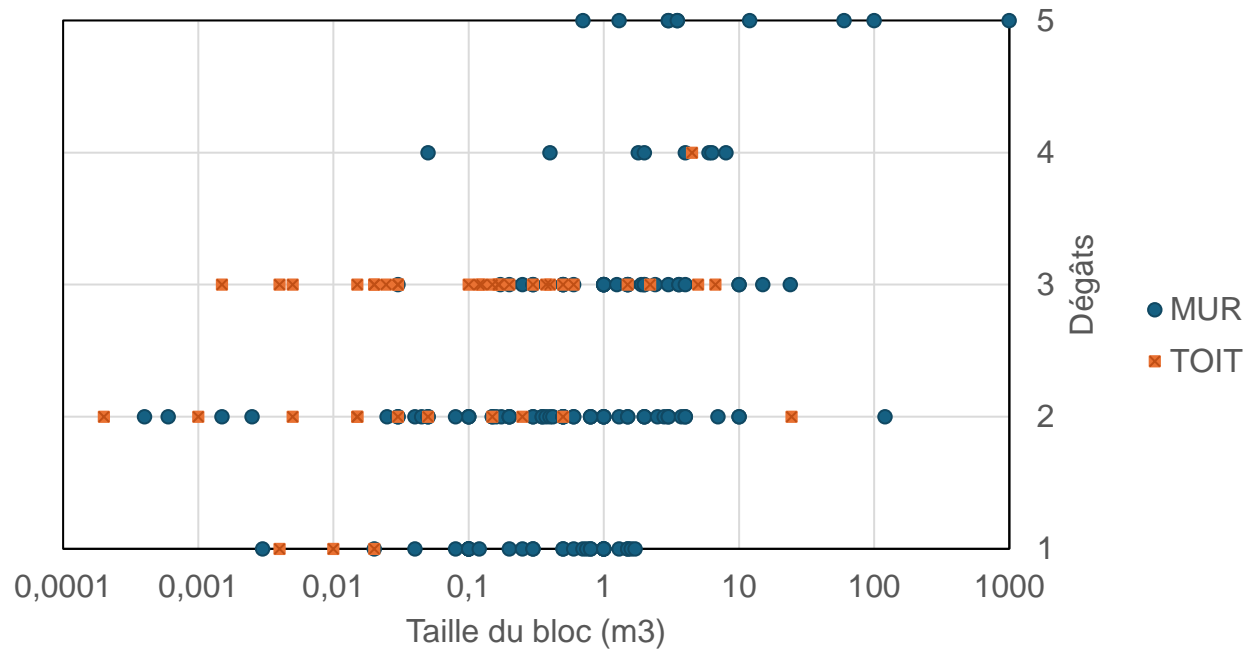
# Base de données – Statistiques : matrice de corrélation



- Corrélation dégâts et taille du bloc
- Faible corrélation différence de hauteur avec volume total éboulement et dégâts

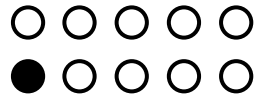


# Base de données – Statistiques : Taille de bloc vs dégâts

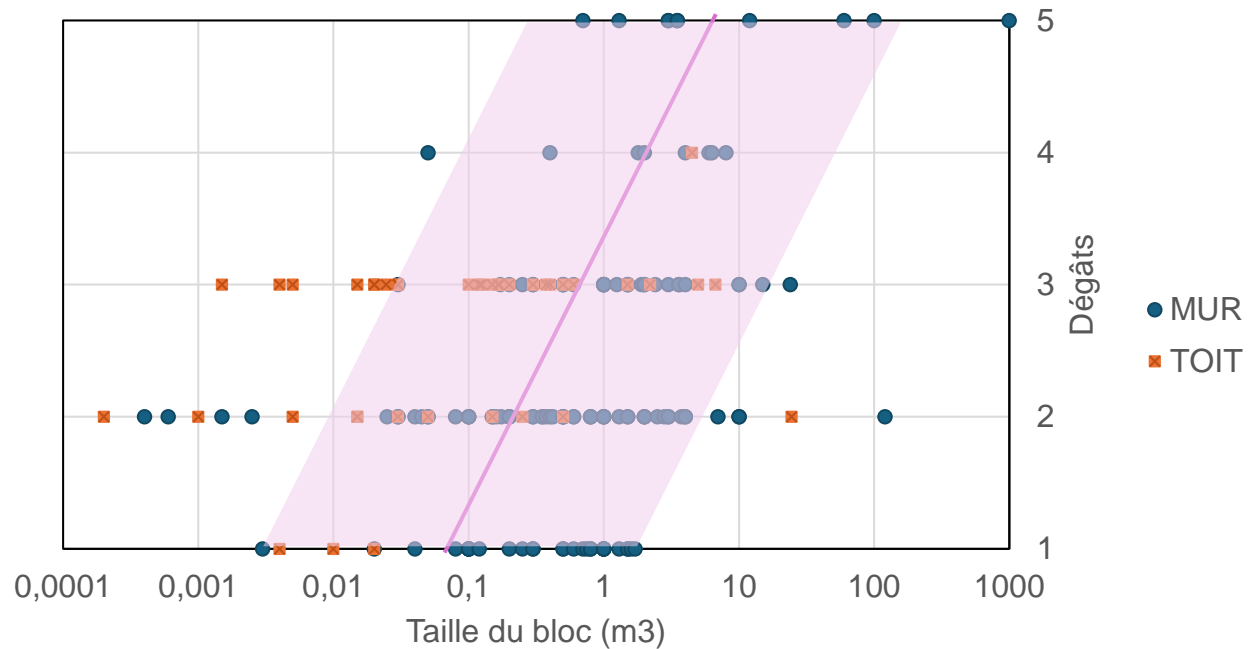


➤ Données dispersées mais tendance générale

➤ Différences apparentes entre toit et mur

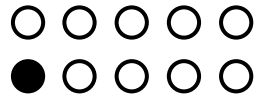


# Base de données – Statistiques : Taille de bloc vs dégâts

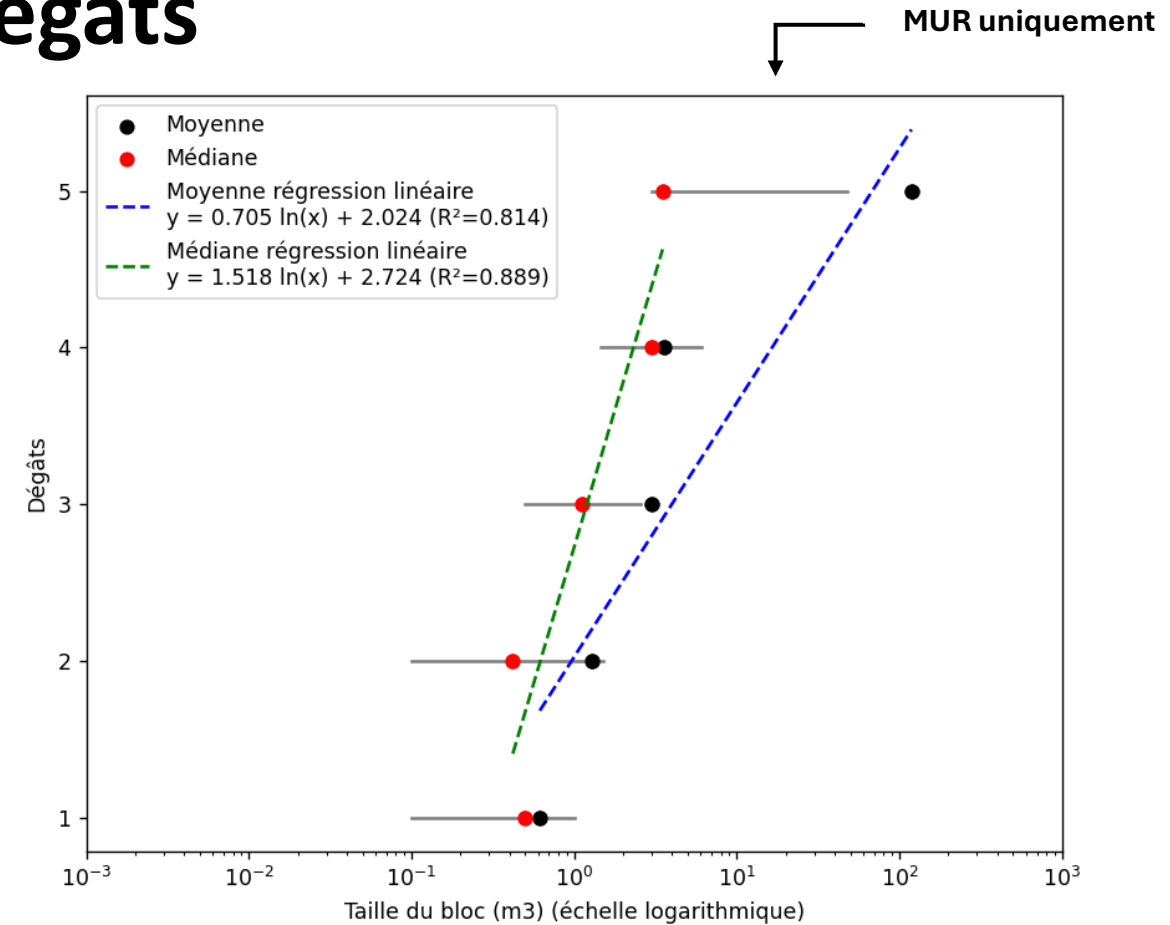
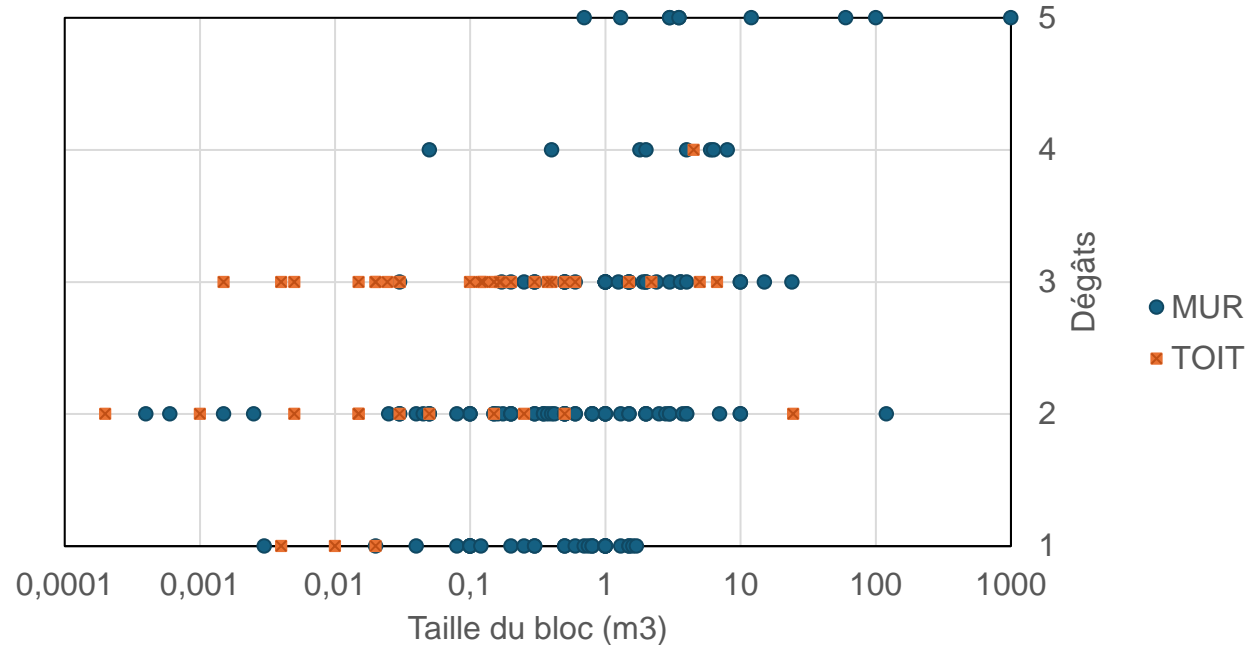


- Données dispersées mais tendance générale
- Différences apparentes entre toit et mur

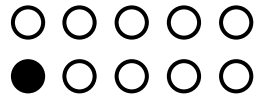




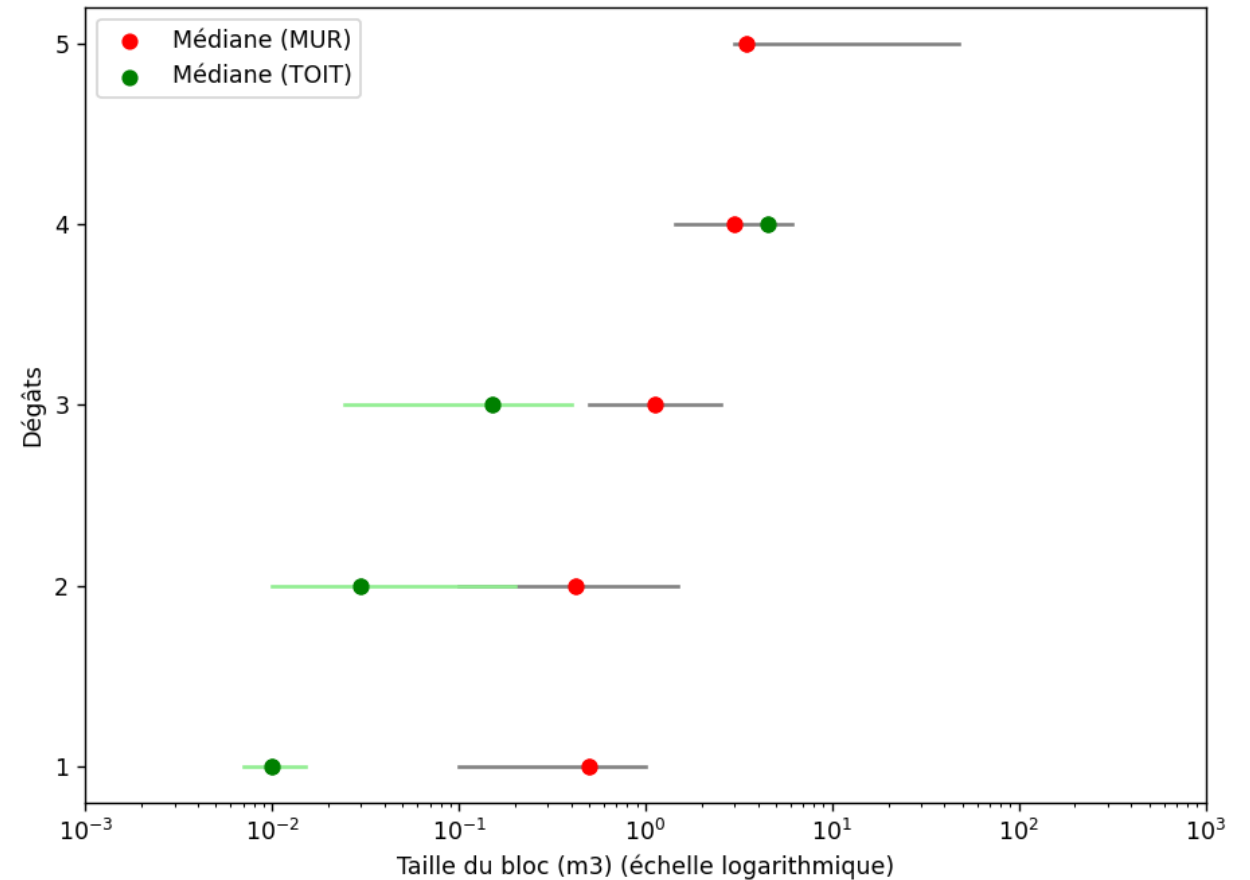
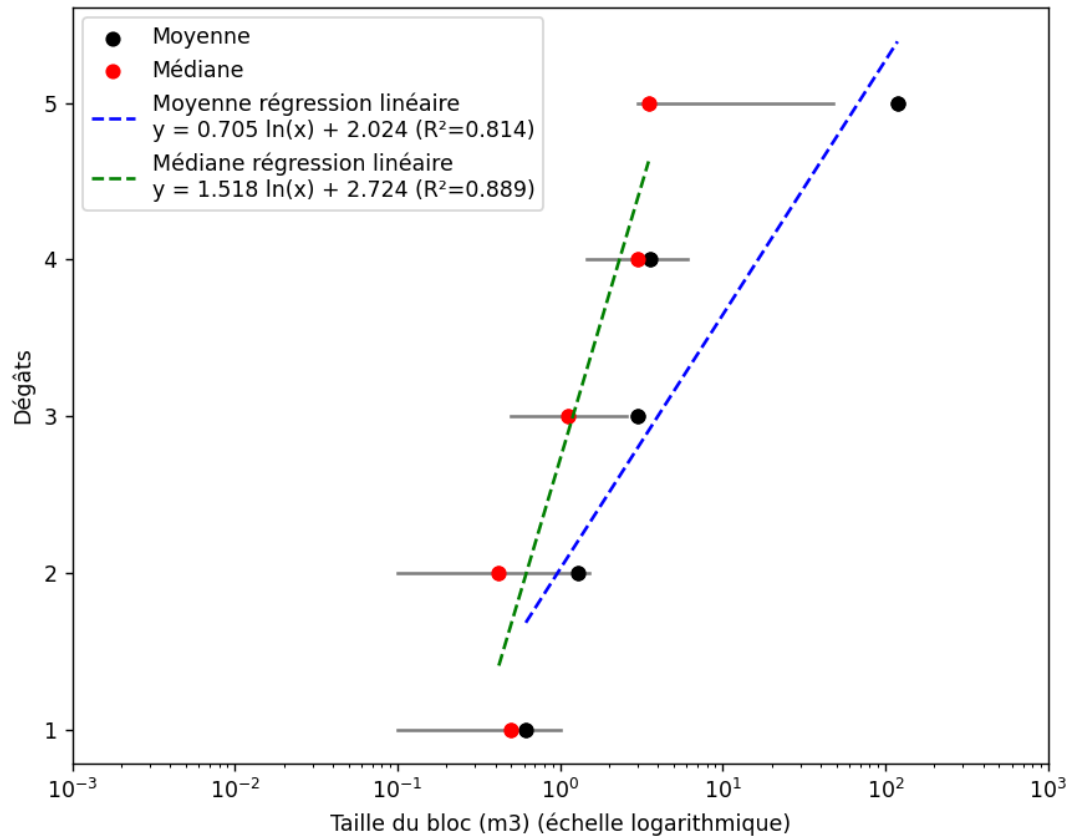
# Base de données – Statistiques : Taille de bloc vs dégâts

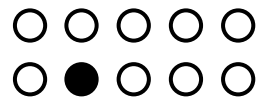


Peut-on trouver un lien entre taille du bloc et dégâts? -> OUI



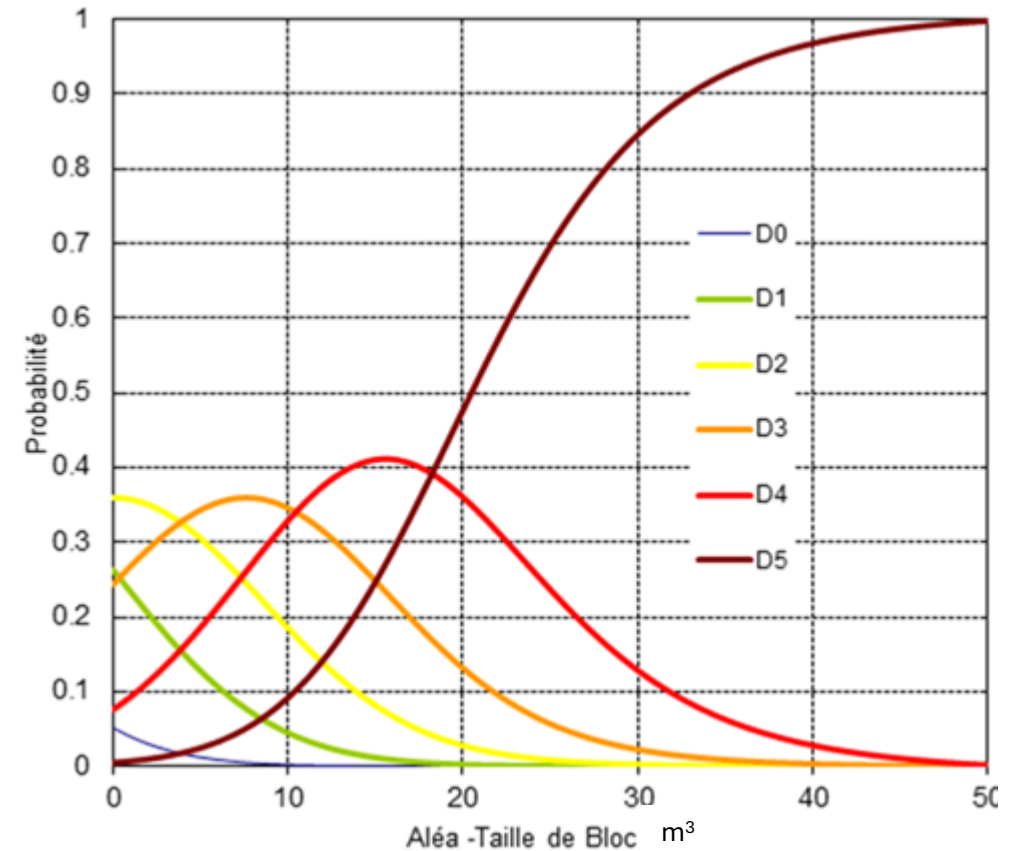
# Base de données – Statistiques : Taille de bloc vs dégâts

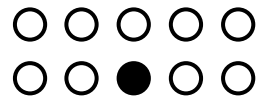




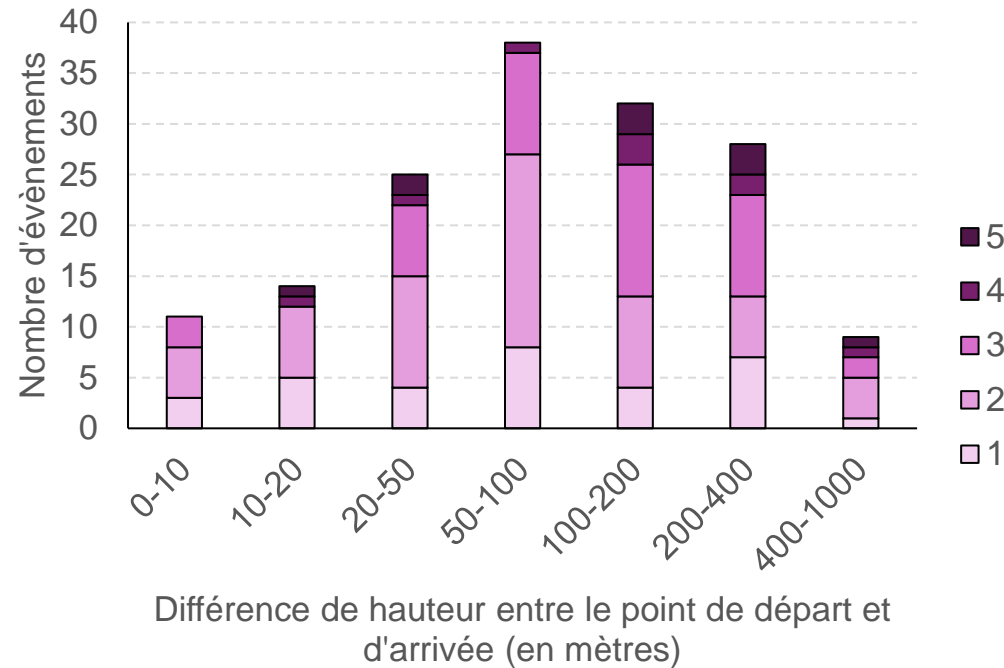
# Base de données – Statistiques : Probabilité de dégâts

Dégâts/ Classe	1	2	3	4	5	(vide )	Total général
[0,01; 0,1)	Probable (n=26)	Très probable (n=38)	Probable (n=27)	Improbable (n=3)	Improbable (n=3)	(n=20)	117
[0,1; 1)	Probable (n=17)	Très probable (n=33)	Très probable (n=27)	Improbable (n=1)	Improbable (n=1)	(n=9)	88
[1; 10)	Peu probable (n=5)	Très probable (n=17)	Très probable (n=18)	Probable (n=7)	Peu probable (n=5)	(n=3)	55
[10; 100)	Probable (n=1)	Probable (n=1)	Probable (n=2)	Improbable (n=0)	Très probable (n=3)	(n=1)	8
Non classé	(n=0)	(n=1)	(n=0)	(n=0)	(n=1)	(n=0)	2
<b>Total général</b>	49	90	74	11	13	33	270



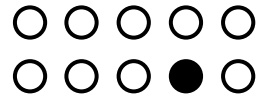


# Base de données – Statistiques : hauteur vs dégâts



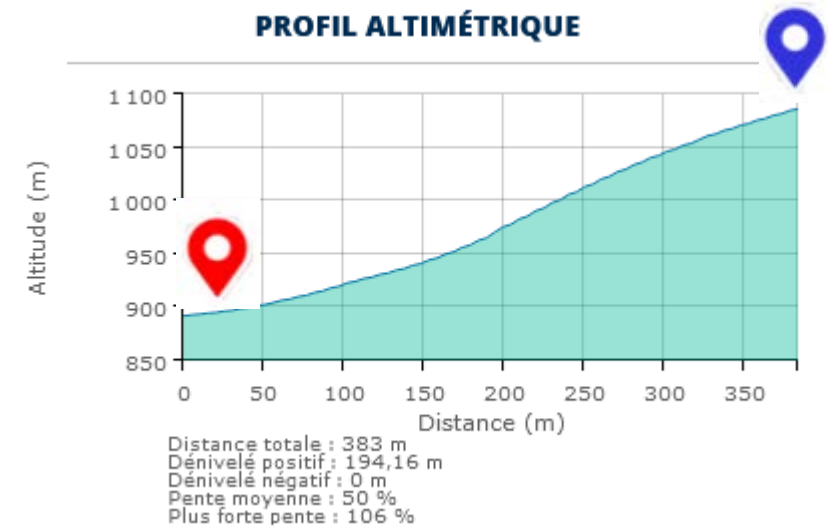
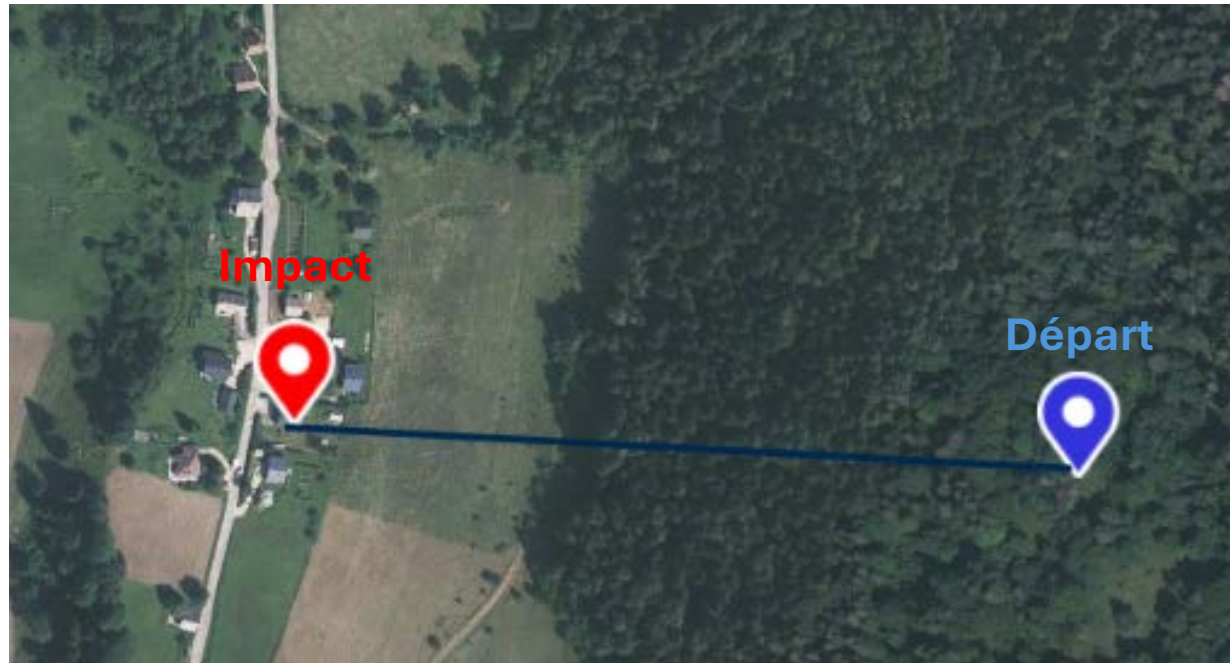
- Dégâts plus élevés pour une différence de hauteur plus grande
- Majorité d'évènements pour une différence de hauteur de 50 à 100m
- Présence de dégâts de type 1 dans chaque catégorie: ralentissement du bloc

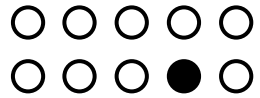




# Base de données – Statistiques :

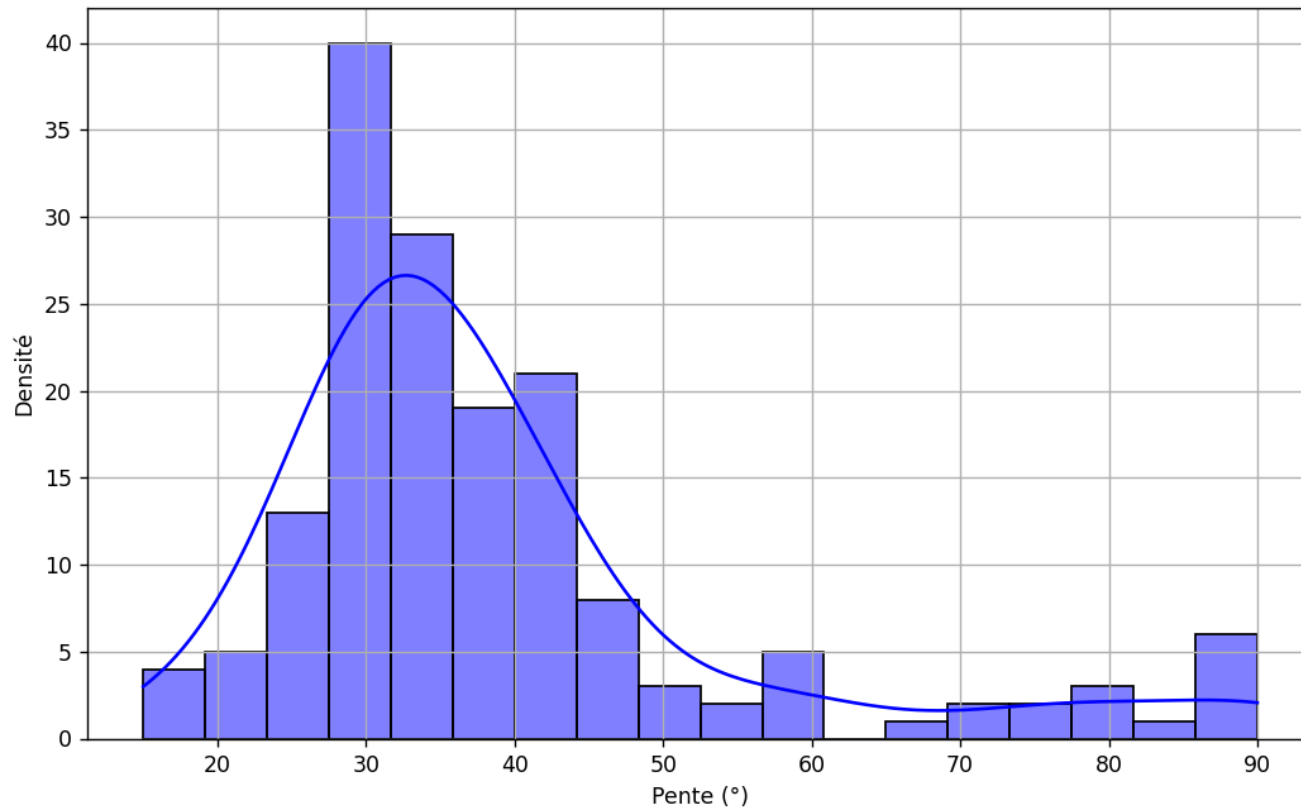
## Ligne d'énergie vs taille de bloc



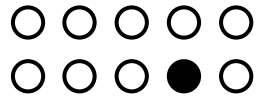


# Base de données – Statistiques :

## Ligne d'énergie vs taille de bloc

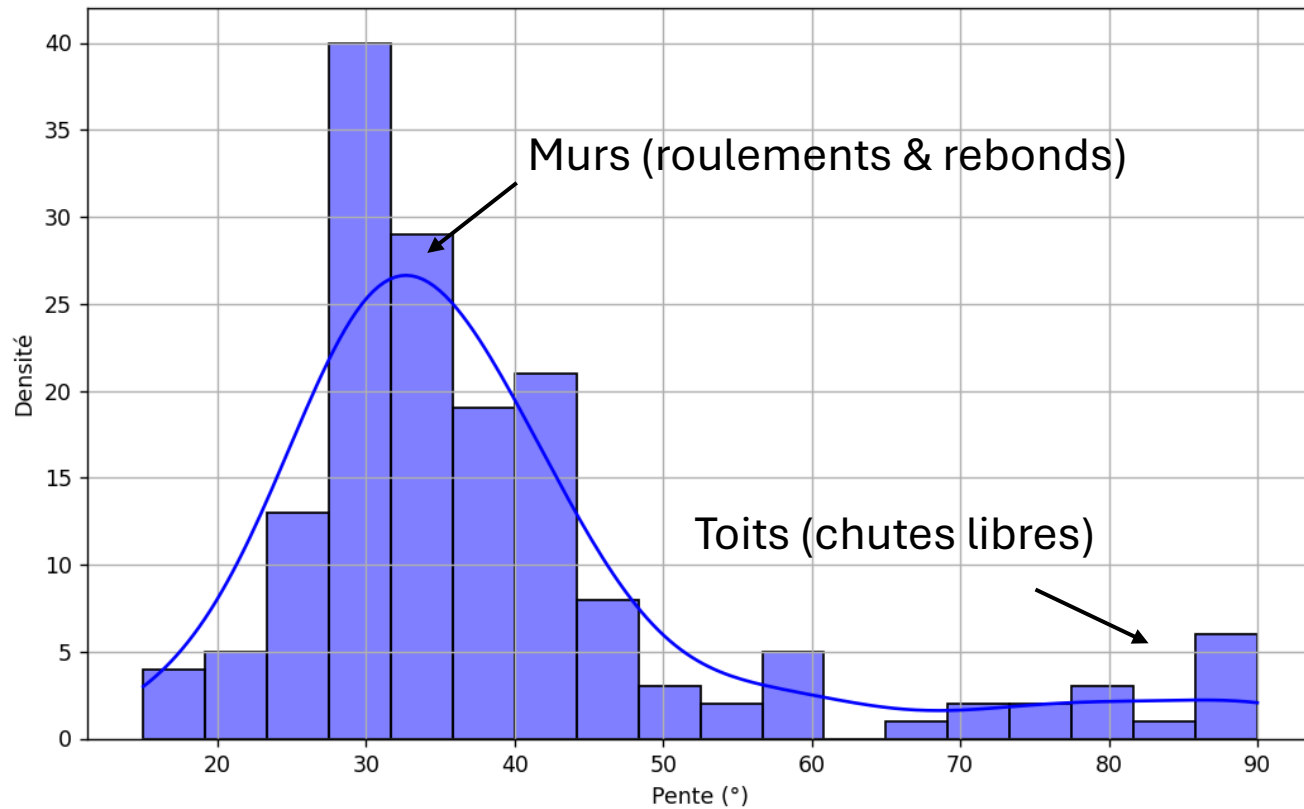


- Répartition bimodale (Dégâts mur et toits)
- Distribution centrée autour de 30° pour les murs

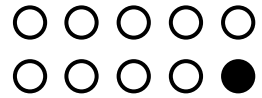


# Base de données – Statistiques :

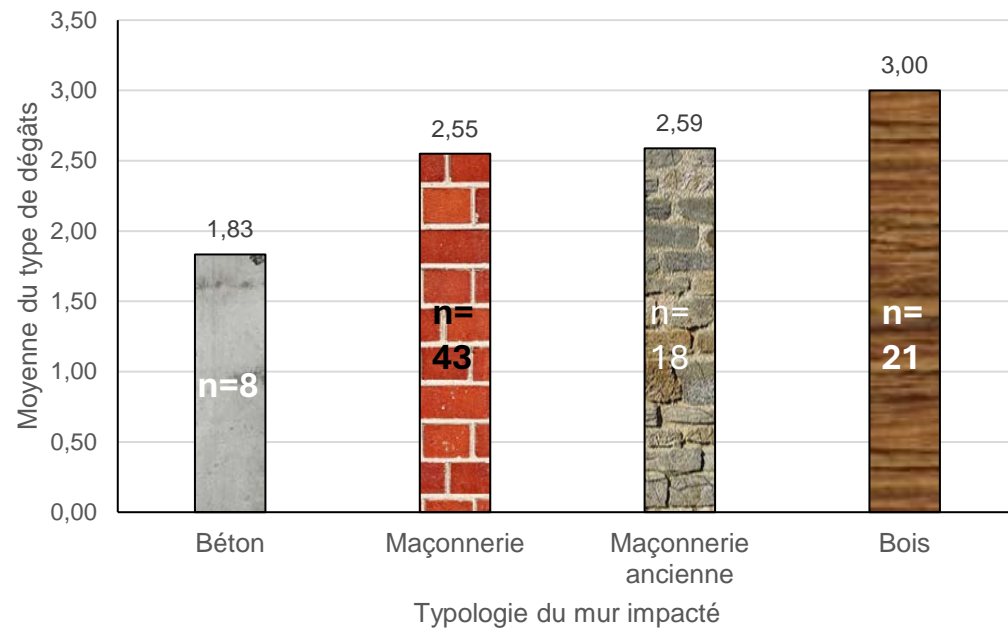
## Ligne d'énergie vs taille de bloc



- Répartition bimodale (Dégâts mur et toits)
- Distribution centrée autour de 30° pour les murs



# Base de données – Statistiques : Types de matériaux vs dégâts

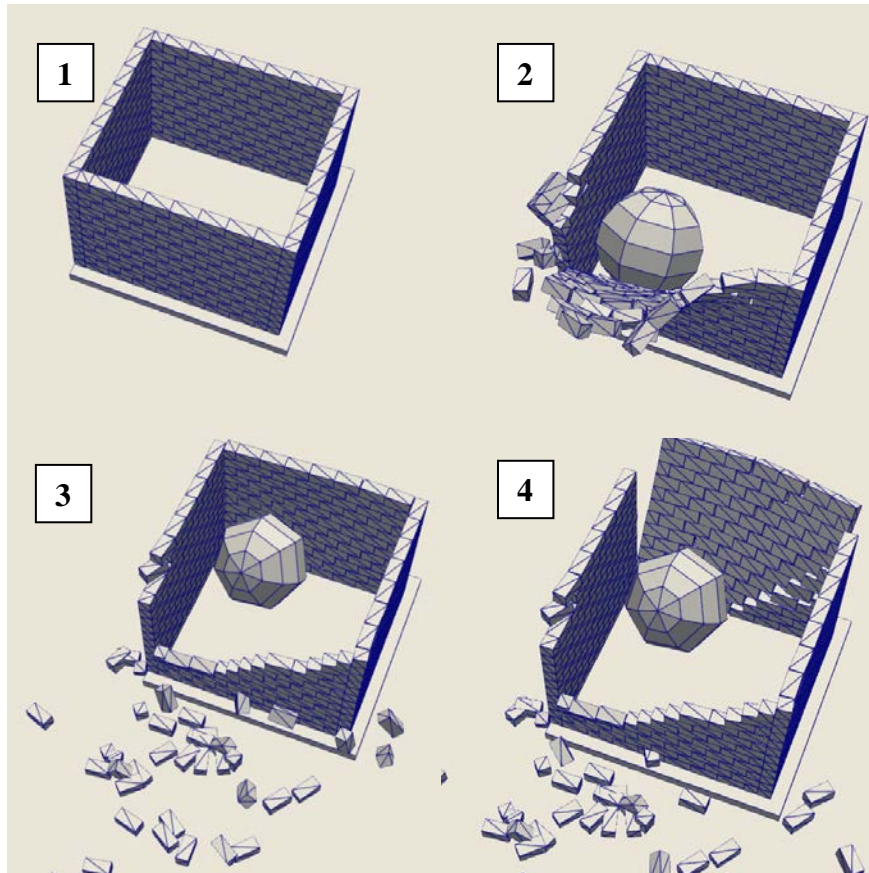


- Premiers résultats de vulnérabilité des bâtiments (murs) selon la topologie
- Bois très vulnérable
- Maçonnerie moyennement vulnérable
- Béton moins vulnérable



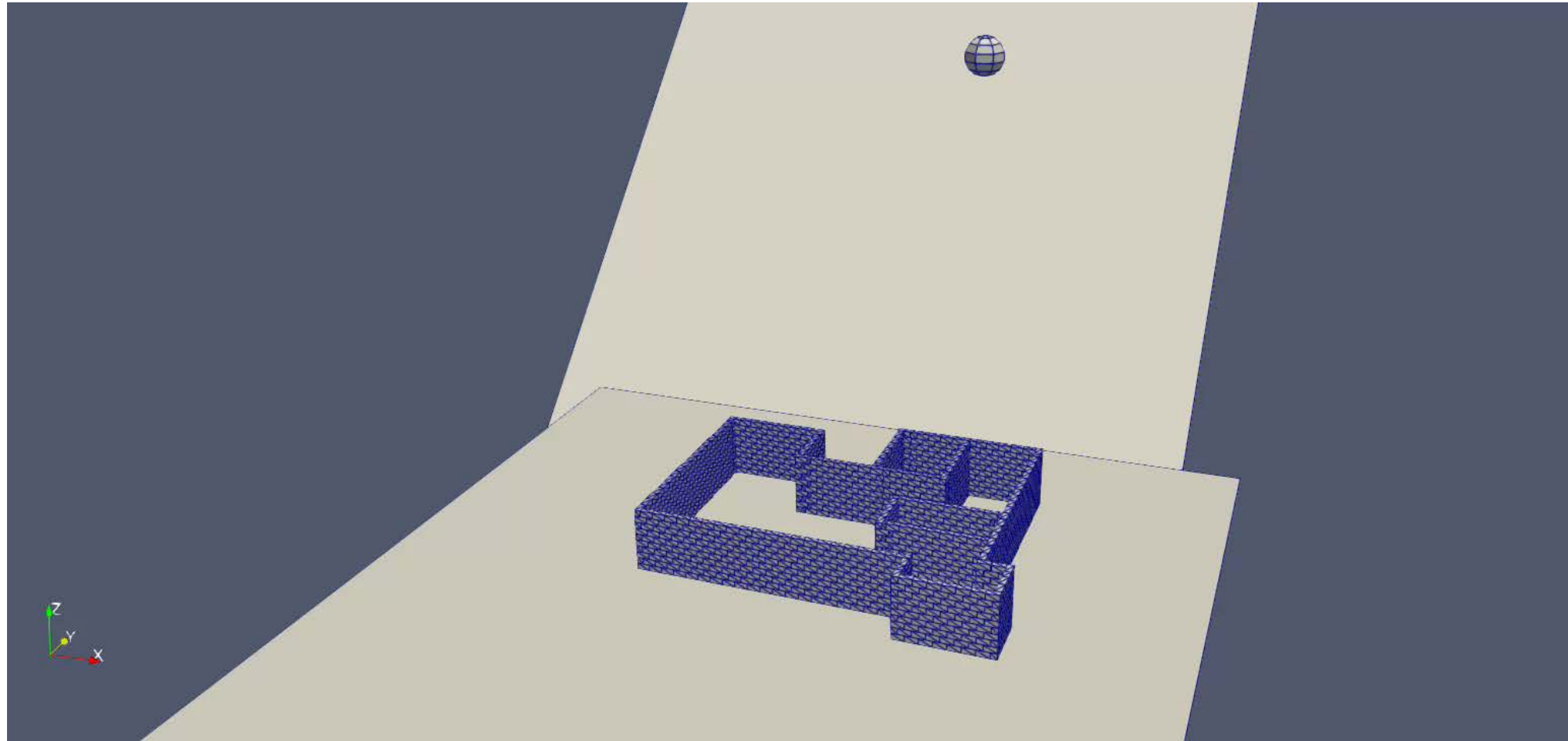
# Modélisation

# Exemple de Modélisation



- Modélisation éléments discrets ( $\neq$  finis de type Mavroulli et al., 2010)
- Lois de comportements, propriétés des matériaux... à définir

# Exemple de Modélisation



# Conclusion

- Il est possible de dresser des tables de vulnérabilité des bâtiments à partir d'évènements passés
- La taille du bloc (volume) et sa vitesse influent grandement sur les dégâts engendrés
- Méthodes probabilistes plus adaptées à la vulnérabilité d'une zone que d'un seul bâtiment
- Nécessité de continuer le travail sur les bases de données et la modélisation



# Merci pour votre attention