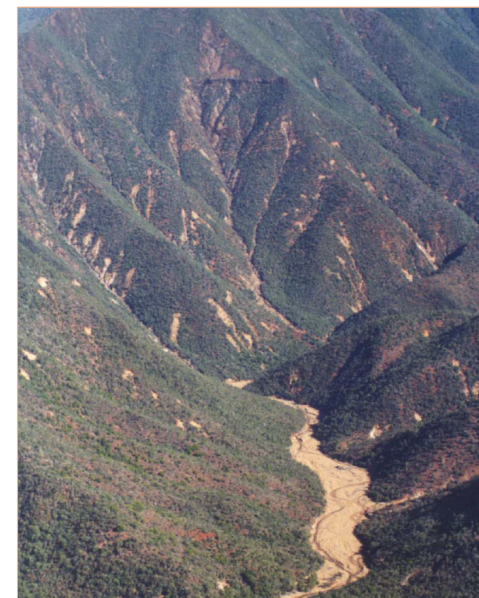


Towards a quantified and global landslide hazard assessment for New Caledonia (South pacific) in a regulatory mapping context – EGU21 - 7862



B. Colas¹, Y. Thiery¹, Y. Guyomard², M. Mengin², O. Monge², V. Mardhel¹, R. Vandromme¹

¹ BRGM (French Geological Survey) (b.colas@brgm.fr) ; ² SGNC (New-Caledonian geological survey)

Towards a quantified and global landslide hazard assessment for New Caledonia (South pacific) in a regulatory mapping context – EGU21 - 7862

B. Colas¹, Y. Thiery¹, Y. Guyomard², M. Mengin², O. Monge², V. Mardhel¹, R. Vandromme¹

¹ BRGM (French Geological Survey) (b.colas@brgm.fr) ; ² SGNC (New-Caledonian geological survey)

Context

- New Caledonia often affected by extreme tropical meteorological events with dramatic consequences
- Lack of information about landslide in New Caledonia
- Elaboration of landslide hazard map in order to build some regulatory rules for land use planning



Method & results

Inventory of the events by visual remote sensing and field observations
Landslide typology

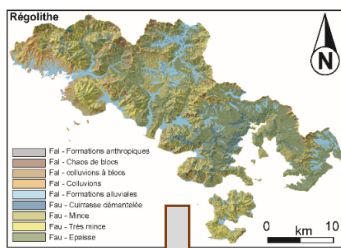
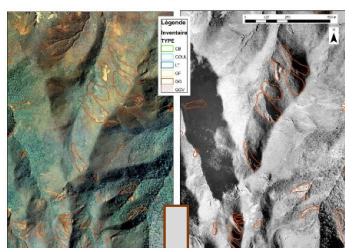
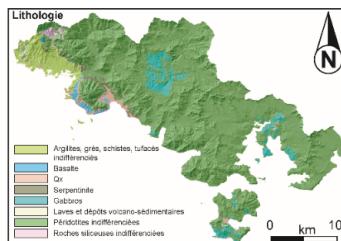
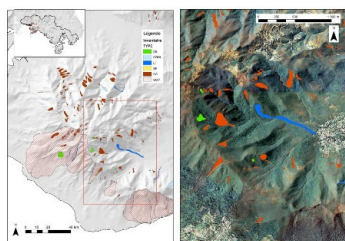
Discriminated mapping of **bedrock & superficial formations** (i.e. regolith: alterations and gravitational deposits)

Calculation of **initiating susceptibility** by a bivariate method

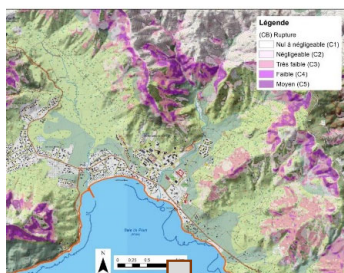
Calculation of the **propagation** of the phenomena by a numerical approach taking into account the energy angle

Integration of the **temporal probability** of occurrence regarding Fell et al. (2008)

Integration of the **intensity** of the phenomena according to the estimated volumes and/or velocity to quantify the hazard



WoE computations: one map per type using regolith / bedrock / slopes / landform classes
Susceptibility thresholds defined relatively to the inventory



FLOW-R for LT/GG/GF
CONEFALL for CB (Energy line angle)
Susceptibility thresholds defined following international standards (JTC-1)

Probabilité de rupture (et d'atteinte)	Probabilité annuelle d'occurrence	
	Nul à négligeable	> 10 ⁻²
Négligeable	Négligeable	10 ⁻⁴ à 10 ⁻⁵
Très faible	Très faible	10 ⁻³ à 10 ⁻⁴
Faible	Faible	10 ⁻² à 10 ⁻³
Moyen	Moyen	10 ⁻¹ à 10 ⁻²
Élevée	Élevée	10 ⁻² à 10 ⁻¹
Très élevée	Très élevée	> 10 ⁻¹

Intensity classes for reference event expected for a 100 years period (considered for reg. in France)
LT: very high / GG: high / GF: moderate / CB: moderate (<1m³)

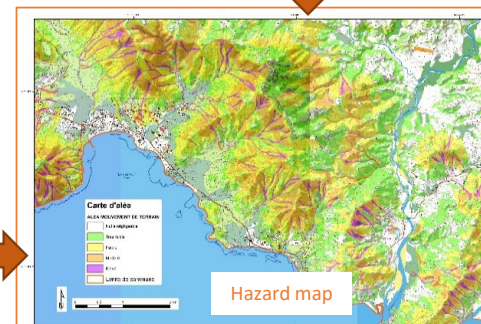
Probabilité d'atteinte	Intensity				
	Très faible	Faible	Moyenne	Élevée	Très élevée
Négligeable	Négligeable	Négligeable	Très faible	Faible	Faible
Très faible	Négligeable	Négligeable	Très faible	Faible	Modérée
Faible	Négligeable	Faible	Modérée	Élevée	Élevée
Moyen	Très faible	Modérée	Modérée	Élevée	Élevée
Élevée	Faible	Modérée	Élevée	Très élevée	Très élevée
Très élevée	Faible	Modérée	Élevée	Très élevée	Très élevée

Time related inventory of landslide
LT: Debris flow
GG: slides in coarse material
GF: slides in fine material
CB: Rock falls

1/10 000 **geological maps** with superficial / bedrock discrimination

1/25 000 **initiating susceptibility maps** by landslide types

1/25 000 **occurrence maps** crossing initiation & propagation by types of landslides

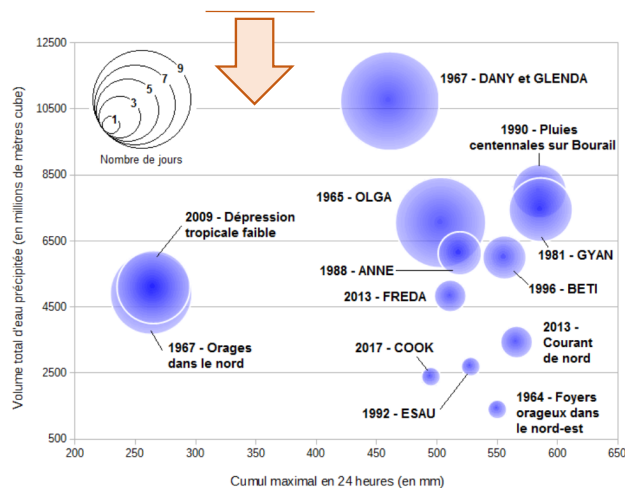


Context

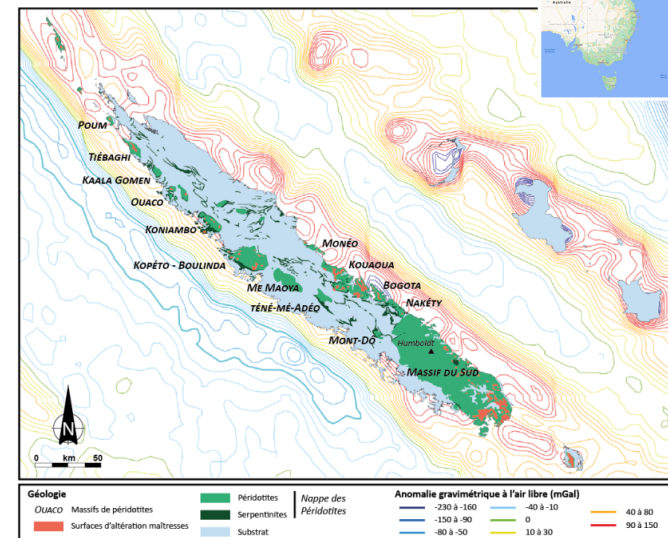
- Geological context defined by:
 - Volcano-sedimentary formations
 - Obduction of peridotites rocks (overthrust on continental crust)
- New Caledonia often affected by extreme tropical meteorological events with dramatic consequences



(<http://pluiesextremes.meteo.fr/nouvelle-caledonie/>)



Houailou, Bel Air 22-11-2016 (SGNC)



Maurizot et Vendé-Leclerc (2009)

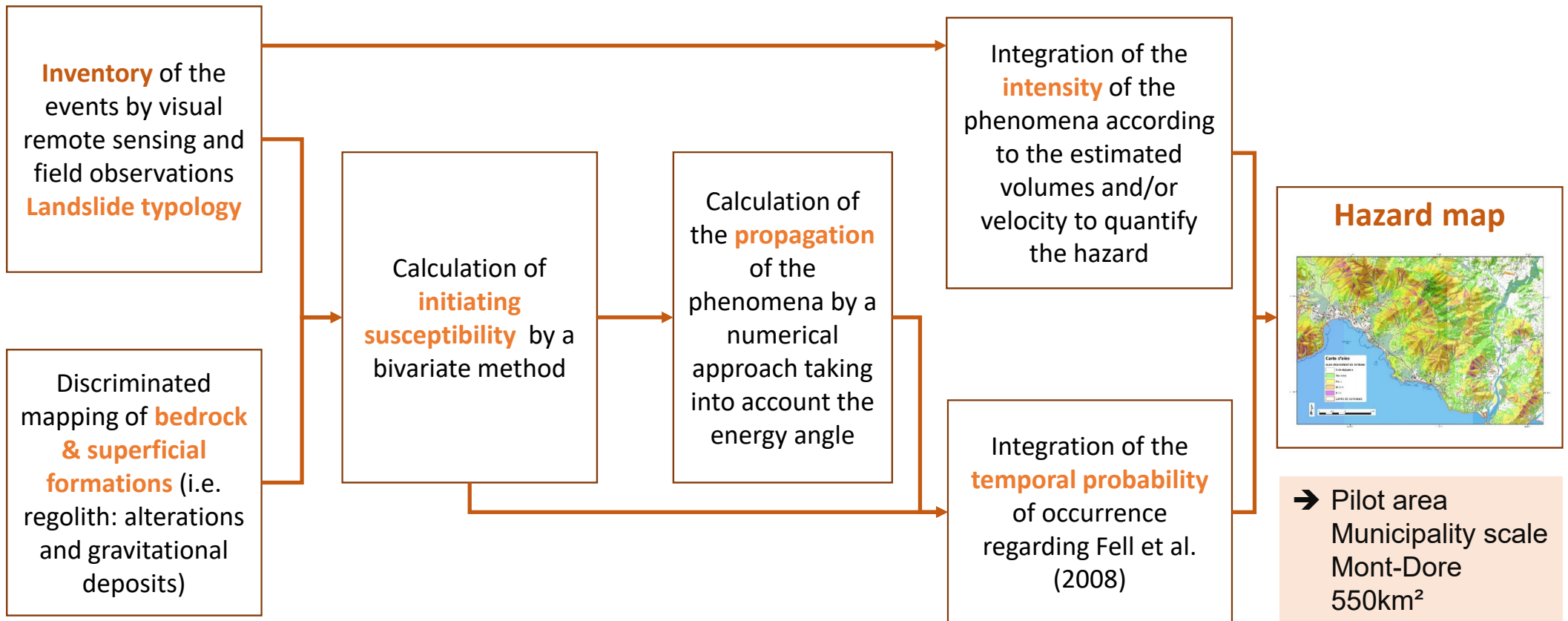


Houailou, Bel Air 24-12-2011 (SGNC)

- Lack of information about landslide

➔ Elaboration of landslide hazard map
in order to build some regulatory rules for land use planning

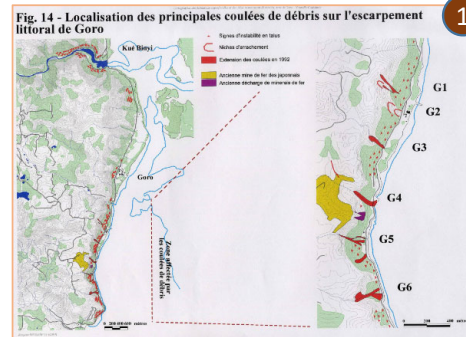
Summary of method



Inventory of events (1)

Bibliographical analysis

- 1 Existing atlas maps
- 2 Press review
- 3 Reports & scientific articles



Une véritable catastrophe pour Païta

Propos du maire de Païta Ronald Martin :

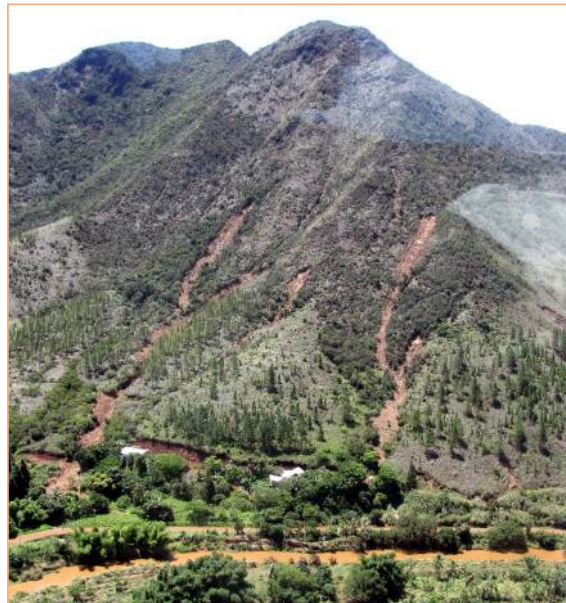
« Nous avons de très gros dépôts sur le réseau routier. Des pistes ont été coupées en plusieurs endroits, le pont du Mont-Mou est obstrué par des rochers, nous ne savons pas exactement dans quel état est la piste qui mène au sanatorium. Elle semble avoir été emportée sur plusieurs mètres. Sur la RT1, le flot a emporté de grandes plaques de coaltar... »

La Tontouta coulait sur la piste

Grossissant, la Tontouta a donné naissance à un nouveau bras de rivière. Celui-ci a coulé pendant toute la journée d'hier... sur la piste de l'aéroport ! Il a réduit la longueur utilisable de celle-ci de 3 000 mètres à 2400 mètres.



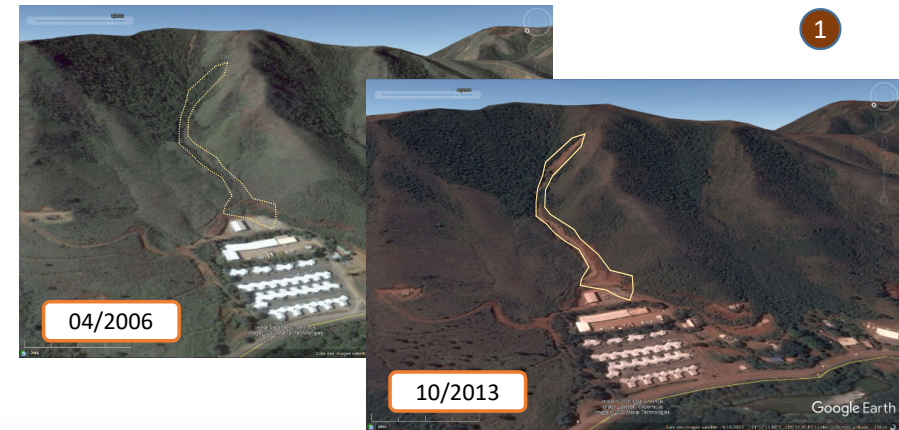
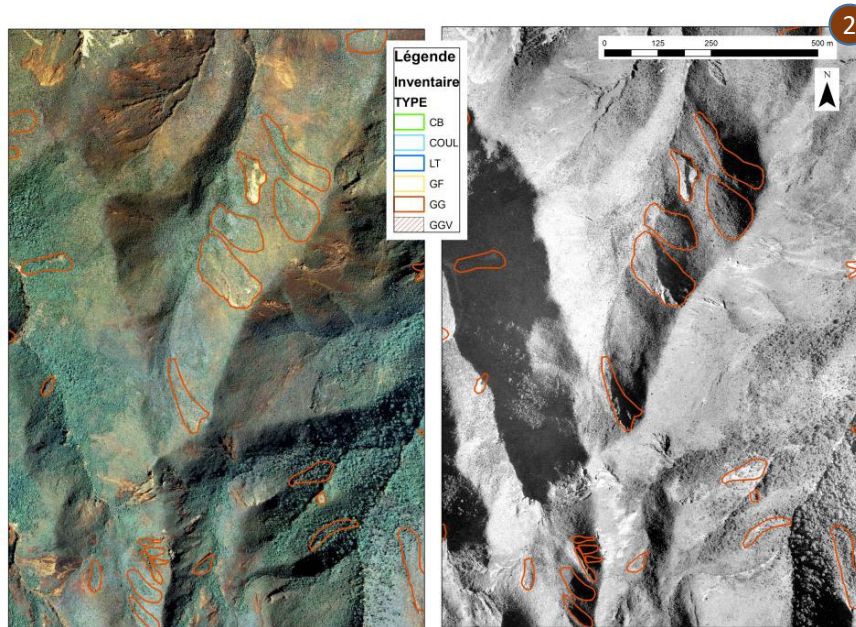
20 m



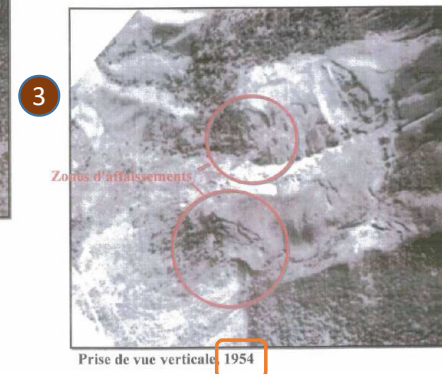
Inventory of events (2)

o Detection by visual remote sensing

- 1 Google earth
- 2 Ortho-photo series 1976 - 2008
- 3 Aerial images (<> dates, no georeferenced)



Aussi bien en 1942 qu'en 1954, deux zones d'affaissement avec marches d'escalier circulaires et concentriques, délimitant des panneaux effondrés sont visibles. Les travaux de la mine Dédé, ne sont dans aucune de ces zones de glissement. Des traces verticales d'éboulements ayant arraché la végétation sont reconnaissables sur les talus situés en-dessous des zones d'instabilités.



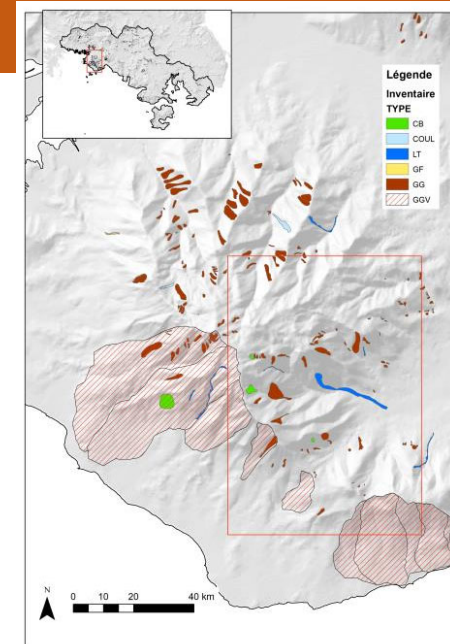
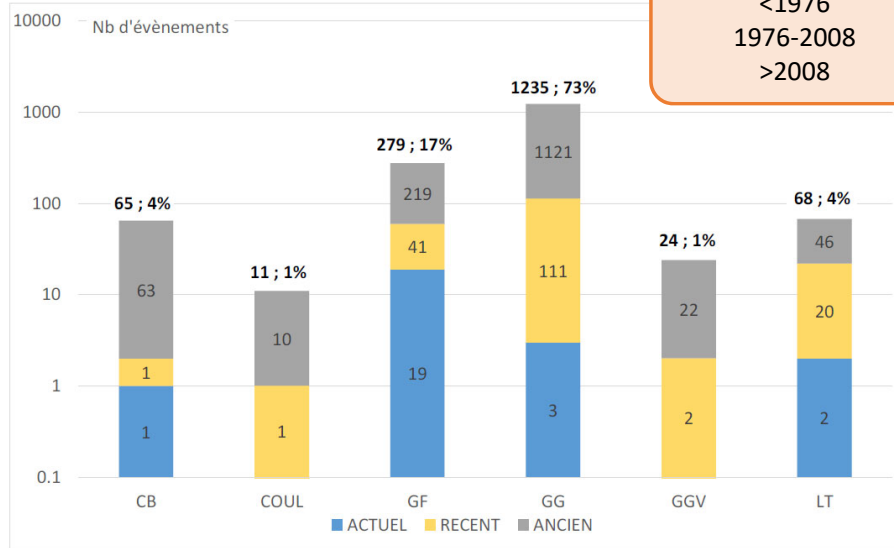
Inventory of events (3) >> toward a typology

Classification of landslide (Varnes classes used)

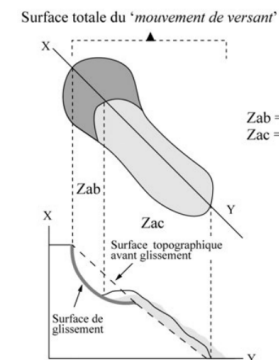
- LT: Debris flow
- GG: slides in coarse material
- GF: slides in fine material
- CB: Rock falls

→ 1682 events

<1976
1976-2008
>2008



Distinction of INITIATION & RUN-OUT

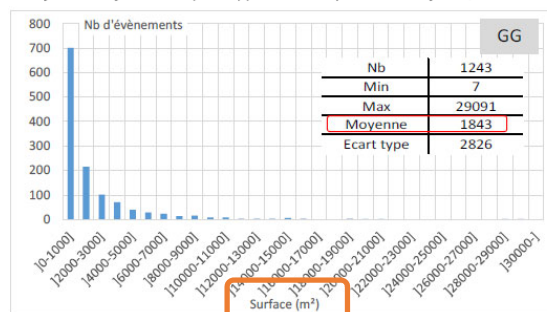
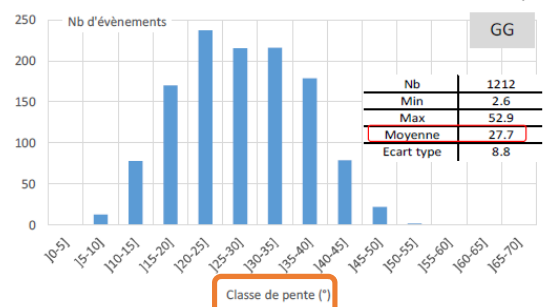


Inventory of events (4a) >> toward a typology

GG >> exemple

GLISSEMENTS GROSSIERS	ILLUSTRATION	MATERIAL	MECANISM	VELOCITY	SURFACE* (m²) LONGUEUR* (m)	EPAISSEUR (m)	PENTES* (°)
INITIATION		Débris rocheux et matrice fine. Produits d'altération graveleux.	Glissement Glissement rotationnel ou translationnel	Rupture brutale avec pas ou peu de précurseurs	100-2000 m²	1 - 3 m	22-42°
PROPAGATION		Grave dominante et matrice fine. Potentiellement remobilisable.	Ecoulement Ecoulement en masse. Peu d'individualisation de trajectoire. Concentration dans les ravines et talweg, ou propagation pleine pente.	Rapide jusque plusieurs mètres / s	< 5000 m² 10 -100 m	0.5 - 2 m	18-35°
ARRÊT		Grave dominante Blocs et matrice fine, Matériaux extrêmement remaniés	Ecoulement Zone de dépôt liée à la morphologie et au volume de matériau mobilisé	-	-	1 - 5 m	-

* : les intervalles de pentes et de surface sont formulées par rapport à la moyenne des objets +/- un écart type



GEOMETRY

Enveloppes totales

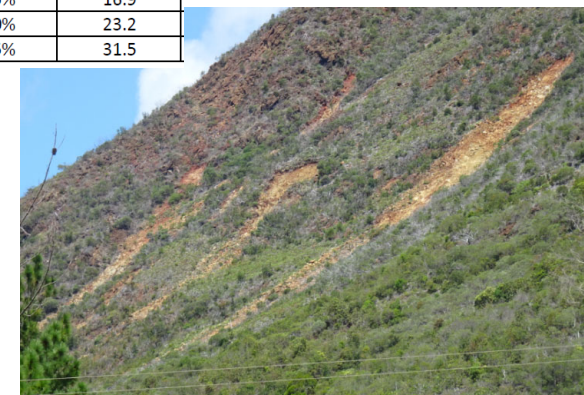
	GG
Nb	1208
Min.	19
Max.	41797
Moyenne	2680
Ecart type	4229

Zones d'initiation

	GG
Nb	1050
Min.	4.6
Max.	57.6
Moyenne	32.0
Ecart type	9.6

Valeurs d'angle de ligne d'énergie pour la propagation

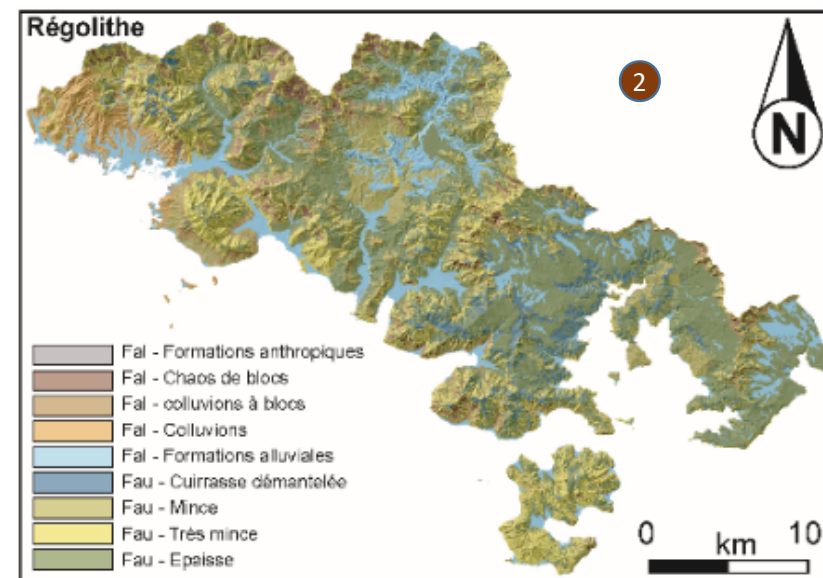
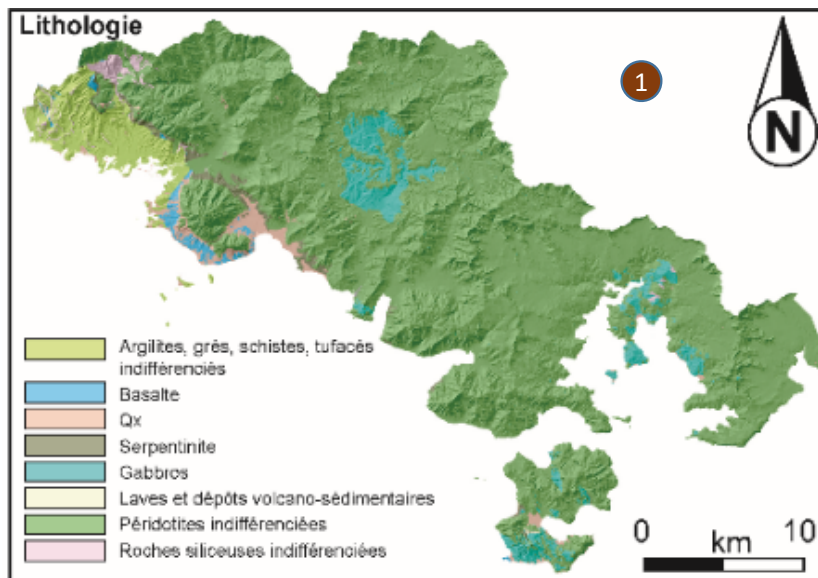
	GG
Nb	1208
Min.	4.6
Max.	51.9
Moyenne	24.2
Ecart type	9.3
Quantiles	
5%	10.6
10%	12.7
25%	16.9
50%	23.2
75%	31.5



Geological mapping

- Existing data 1/50000 scale geological maps (BRGM)
 - Direct valorization for Bed-rock map ①
- NEW** superficial formations maps 1/10000 scale (SGNC)
 - Weathered formations ②
 - Hydro-gravitationnal deposits

- Geomorphological mapping
- Field survey



Susceptibility (1)

STATISTICAL approach on INITIATING AREA for each TYPES of phenomena

Data driven method: Weight of evidence (Bonham-Carter, 1996)

- Landslide inventory (4 landslide types)
- Spatial data available for all territory (predictive variables)
- Sensitivity analysis on predictive variables:

SUBSTRAT: bed-rock

FORM_SUP: superficial formation

LANDFORM: morphology (Iwahashi and Pike, 2007)

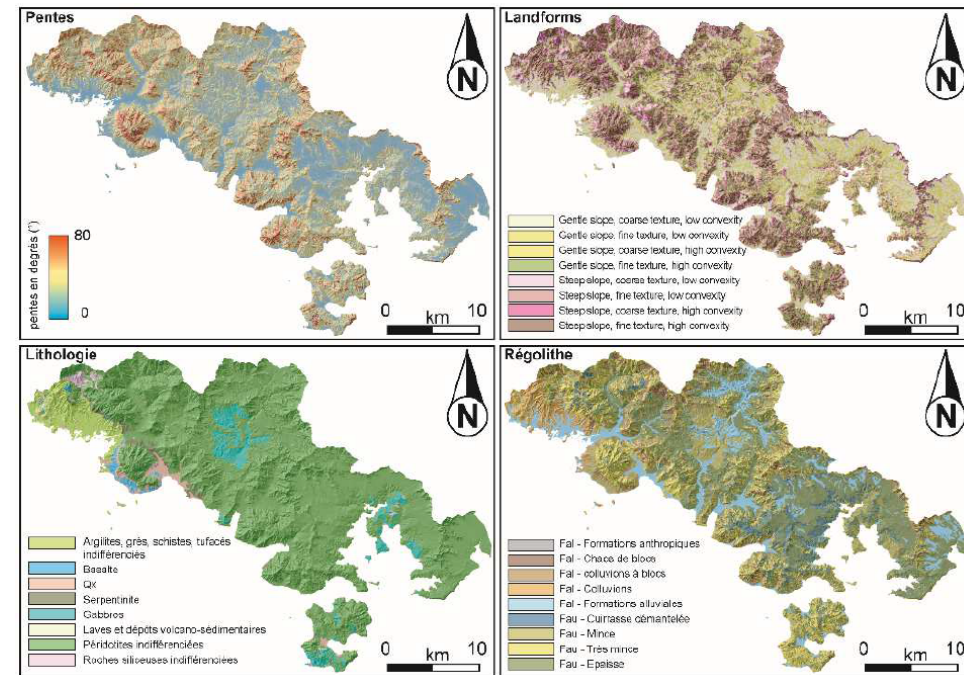
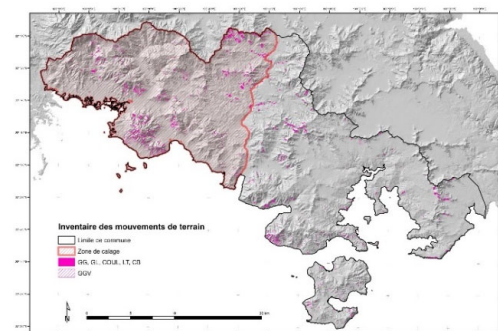
PENTE: slope

50% of inventory used

- Susceptibility thresholds defined relatively to the inventory through **5 classes** C1 to C5 & compared to JTC-1 recommendations

Relative susceptibility classes based on the acceptance rate

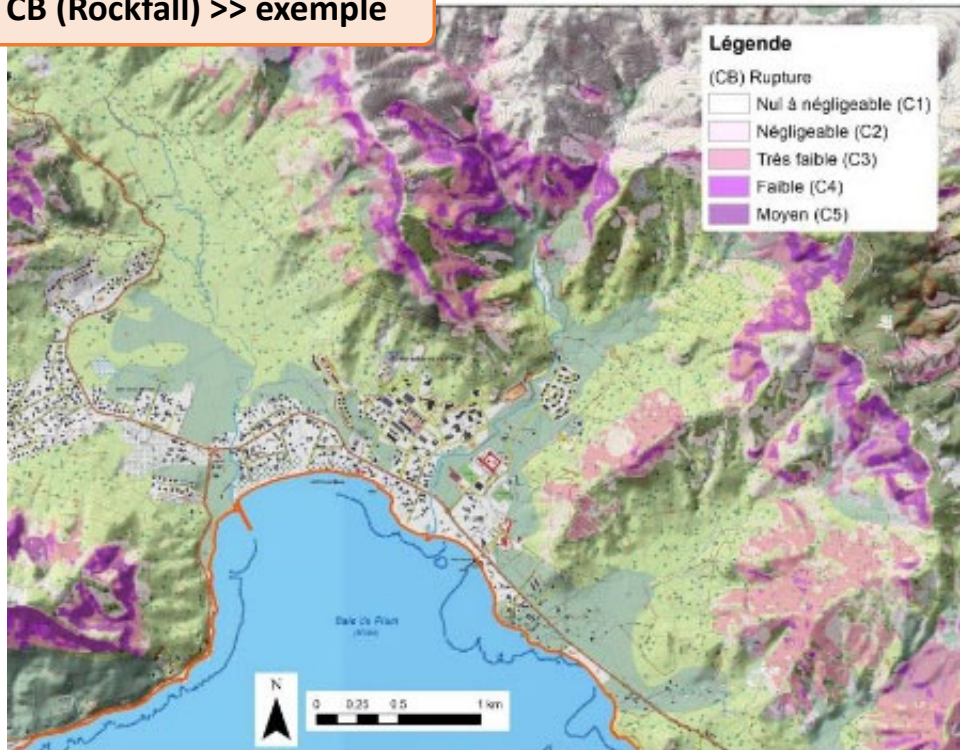
(i.e. high >50% landslides acceptance; moderate: 50-25%; low 25-5%; nul: <5%)



Susceptibility of failure (2)

- **STATISTICAL** approach on **INITIATING AREA** for each **TYPES** of phenomena

CB (Rockfall) >> exemple

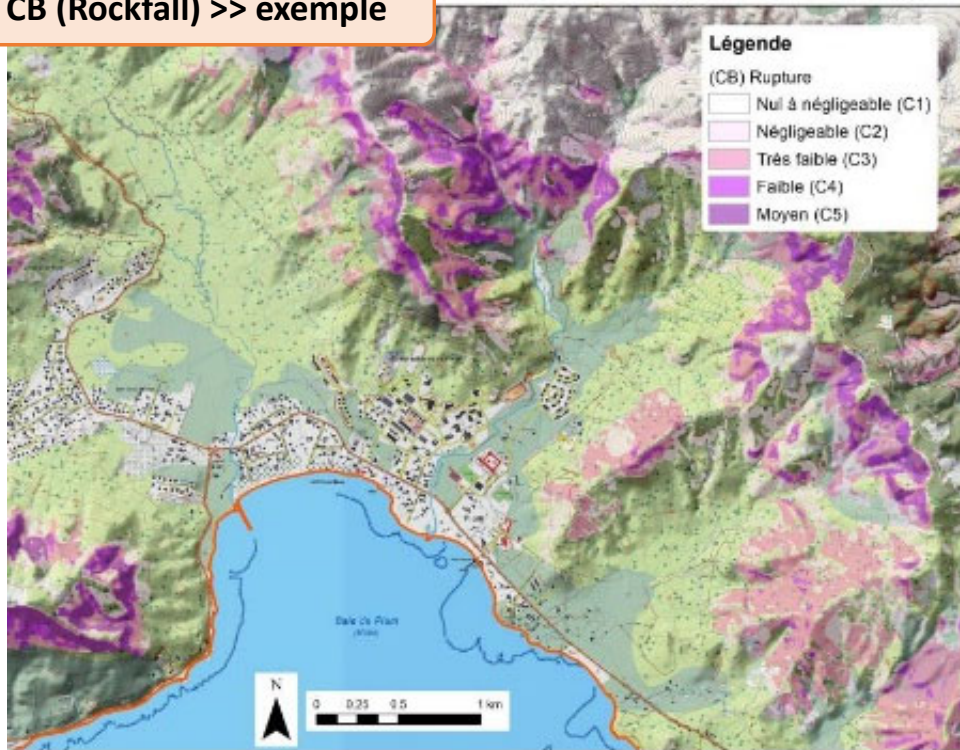


Hazard descriptor	Rock falls from natural cliffs or rock cut slope Number/annum/km of cliff or rock cut slope	Slides of cuts and fills on roads or railways Number/annum/km of cut or fill	Small landslides on natural slopes Number/km ² /annum	Individual landslides on natural slopes Annual probability of active sliding	
Very high	>10	>10	>10	10^{-1}	Très fort
High	1 to 10	1 to 10	1 to 10	10^{-2}	Fort
Moderate	0.1 to 1	0.1 to 1	0.1 to 1	10^{-3} to 10^{-4}	Moyen
Low	0.01 to 0.1	0.01 to 0.1	0.01 to 0.1	10^{-5}	Faible
Very low	<0.01	<0.01	<0.01	< 10^{-6}	Très faible
				< 10^{-6}	Négligeable
				< 10^{-7}	Nul à négligeable

Susceptibility of failure (2)

- STATISTICAL approach on INITIATING AREA for each TYPES of phenomena

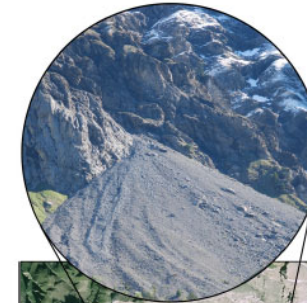
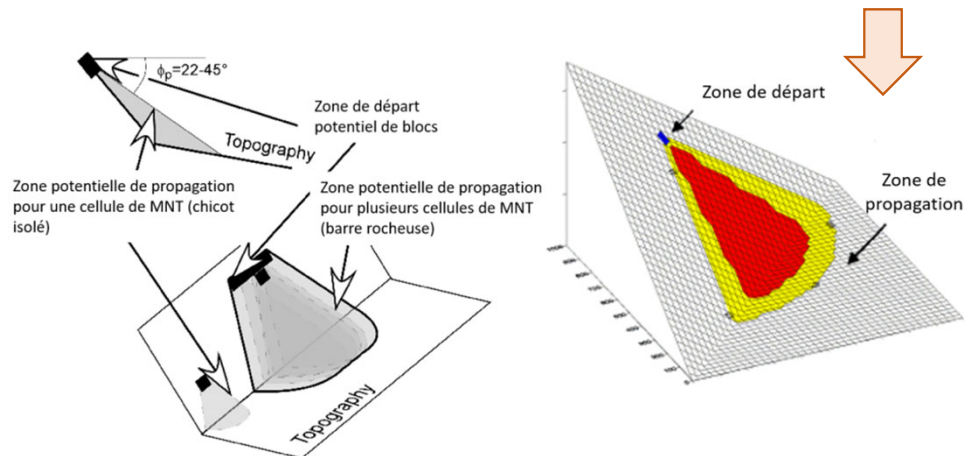
CB (Rockfall) >> exemple



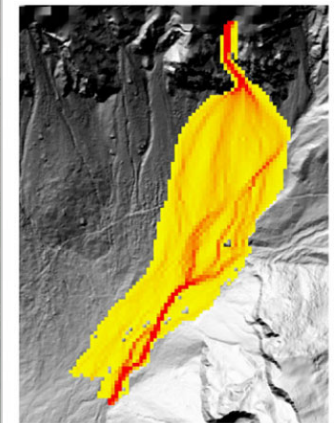
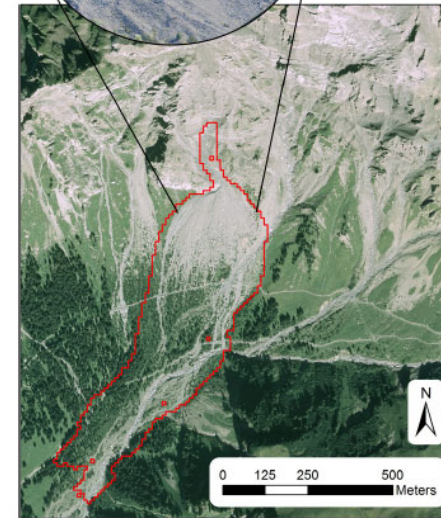
Hazard descriptor	Rock falls from natural cliffs or rock cut slope Number/annum/km of cliff or rock cut slope	Slides of cuts and fills on roads or railways Number/annum/km of cut or fill	Small landslides on natural slopes Number/km ² /annum	Individual landslides on natural slopes Annual probability of active sliding	
Very high	>10	>10	>10	10^{-1}	Très fort
High	1 to 10	1 to 10	1 to 10	10^{-2}	Fort
Moderate	0.1 to 1	0.1 to 1	0.1 to 1	10^{-3} to 10^{-4}	Moyen
Low	0.01 to 0.1	0.01 to 0.1	0.01 to 0.1	10^{-5}	Faible
Very low	<0.01	<0.01	<0.01	< 10^{-6}	Très faible
				< 10^{-6}	Négligeable
				< 10^{-7}	Nul à négligeable

Run-out (1)

- **SPECIFIC APPROACH** for each **TYPES** of phenomena
- **LT / GG / GF** >> FLOW-R (Flow path assessment of gravitational hazards at Regional scale, Horton, 2013)
- **CB** >> Energy line angle CONEFALL (Jaboyedoff, M. and Labieuse, 2010)



Example of modelisation DEM 10 m (Solalex, Suisse, from Horton et al, 2013)



Run-out (2)

Calibration parameters

- Calibration of models from inventory data

Paramètres de propagation (Flow-R / Ligne d'énergie)

From
percentile of
inventory

		GG	GF	COUL	LT	CB*
Ligne d'énergie	Très faible	10°	7°	-	12° ↓	28°
	Faible			-		
	Moyenne	13°	9°	-		30°
	Forte	17°	12°	-		32°
	Très forte	23°	15°	-		35-38°
Paramètres Flow-R	Inertie	Weight = Cosinus	Weight = Cosinus	-	Direction memory: length = 10 - open = 120	12° (ouverture 1/2 cône)
	Direction	Holmgren (1994) = 25	Holmgren (1994) = 25	-	Holmgren (1994) = 5.0	
	Vitesse	≤ 5.m.s-1	≤ 0.5 m.s-1	-	≤ 10.m.s-1	

Occurrence = “reach probability”

GG >> exemple

- Occurrence =
Initiation x Propagation

		Probabilité annuelle d'occurrence
Probabilité de rupture (et d'atteinte)	Nul à négligeable	$< 10^{-7}$
	Négligeable	10^{-7} à 10^{-6}
	Très faible	10^{-6} à 10^{-5}
	Faible	10^{-5} à 10^{-4}
	Moyen	10^{-4} à 10^{-3}
	Elevée	10^{-3} à 10^{-2}
	Très élevée	$> 10^{-2}$

From susceptibility maps vs inventory periods

on

Calculation of
run-out

From
percentile of
inventory

rupture (et d'atteinte)	Faible	10^{-5} à 10^{-4}
	Moyen	10^{-4} à 10^{-3}
	Elevée	10^{-3} à 10^{-2}
	Très élevée	$> 10^{-2}$

	Probabilité de propagation							
Probabilité annuelle de rupture	Négligeable	Très faible	Faible	Moyenne	Forte	Très forte		
	10^{-6}	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	
Très faible	Nul à négligeable					Négligeable	Très faible	
Faible	Nul à négligeable				Négligeable	Très faible	Faible	
Moyen	Nul à négligeable			Négligeable	Très faible	Faible	Moyen	
Fort	Nul à négligeable		Négligeable	Très faible	Faible	Moyen	Fort	
Très fort	Nul à négligeable	Négligeable	Très faible	Faible	Moyen	Fort	Très fort	
Très fort	Négligeable	Très faible	Faible	Moyen	Fort	Très fort	Très fort	
	1							
Valeurs d'angle de la ligne d'énergies pour FLOW-R selon probabilité de propagation			10°	13°	17°	23°		

Propagations calculées pour les ruptures spatiales qualifiées de "moyenne" à "très forte"

Intensity (1)

Background

- In France for regulatory maps intensity is defined from the potential damages to “standard” building

Intensité limitée	Intensité modérée	Intensité élevée	Intensité très élevée
Dommages limités, non structurels sur un bâti standard	Dommages structurels au bâti standard Pas de dommages au bâti adapté à l'aléa	Destruction du bâti standard Dommages structurels du bâti adapté à l'aléa moyen	Destruction du bâti standard Destruction du bâti adapté à l'aléa moyen

Exemple of intensity scale (French national guide for landslide mapping, 1999)

Others references

Velocity class	Description	Velocity (mm/s)	Typical velocity	Response ^a
7	Extremely rapid	5×10^3	5 m/s	Nil
6	Very rapid	5×10^1	3 m/min	Nil
5	Rapid	5×10^{-1}	1.8 m/h	Evacuation
4	Moderate	5×10^{-3}	13 m/month	Evacuation
3	Slow	5×10^{-5}	1.6 m/year	Maintenance
2	Very slow	5×10^{-7}	16 mm/year	Maintenance
1	Extremely Slow			Nil

International Geotechnical Society's UNESCO Working Party on
World Landslide Inventory, 1995, Cruden DM, Varnes DJ, 1996

Classe de vitesse	CE	AD	CT	Gr	GR	GT	GD	Dégâts probables
ER $> 5 \text{ m.s}^{-1}$								catastrophe majeure, structures détruites, équipements détruits, pas de survivants
TR 5 m.s^{-1}								structures et équipements détruits, évacuation non possible, blessés et vies perdues
R 3 m.min^{-1}								structures et équipements détruits, évacuation possible
M 1.8 m.h^{-1}								les structures lourdes peuvent être maintenues, blessés quelques morts
L 13 m.mois^{-1}								travaux de remédiation possibles pendant le glissement
TL 1.6 m.an^{-1}								structures peu endommagées
EL $< 0.5 \text{ m}^{-1}$								imperceptible sans instrumentations, construction possible

ER : extrêmement rapide
TR : très rapide
R : rapide
M : modéré
L : lent
TL : très lent
EL : extrêmement lent

CE : coulée/écoulement
AD : avalanche de débris
CT/CD : coulées de terre/de débris
Gr : glissement rocheux
GR : glissement rotationnel
GT : glissement translationnel
GD : glissement de débris

r : roche
b : bloc
s : sol

Exemple of intensity scale (Thiery, 2007)

Intensity (2)

- New Caledonia >> choice in accordance with local government

LT / GG / GF >> velocity based scale

Vitesse			Conséquences		Intensité	Phénomène NC
mm/s	typique	Qualification	Impacts	Réponse		
5000 =>	5 m/s	ER	Catastrophe majeure	-	Très élevée	LT
50 =>	3 m/min	TR	Structure détruite		Elevée	GG
0.5 =>	1,8 m/h	R	Structure détruite, possible évacuation	Evacuation	Modérée	GF
0.005 =>	13 m/mois	M	Qq structures résistent			
0.00005 =>	1,6 m/an	L	Possibles intervention travaux	Intervention		
0.0000005 =>	16 mm/an	TL	Structure peu endommagées			
		EL	Imperceptible	-		

ER.extrêmement rapide / TR.Très rapide / R.Rapide / M.Modérée / L.Lent / TL.Très lent / EL.extrêmement lent

CB >> volume based scale

Indices d'intensité	Description	Indications sur les dommages
Très faible	Le volume unitaire pouvant se propager est inférieur ou égal à 0,05 m ³	Peu ou pas de dommage au gros œuvre, perturbation des activités humaines.
Faible	Le volume unitaire pouvant se propager est supérieur à 0,05 m ³ mais inférieur ou égal à 0,25 m ³	Peu de dommage au gros œuvre, perturbation des activités humaines.
Moyen	Le volume unitaire pouvant se propager est supérieur ou égal à 0,25 m ³ mais inférieur ou égal à 1 m ³	Domage au gros œuvre sans ruine. Intégrité structurelle sollicitée.
Fort	Le volume unitaire pouvant se propager est supérieur à 1 m ³ mais inférieur ou égal à 10m ³	Domage important au gros œuvre. Ruine probable. Intégrité structurelle remise en cause.
Très fort	Le volume unitaire pouvant se propager dépasse 10 m ³	Destruction du gros œuvre. Ruine certaine. Perte de toute intégrité structurelle

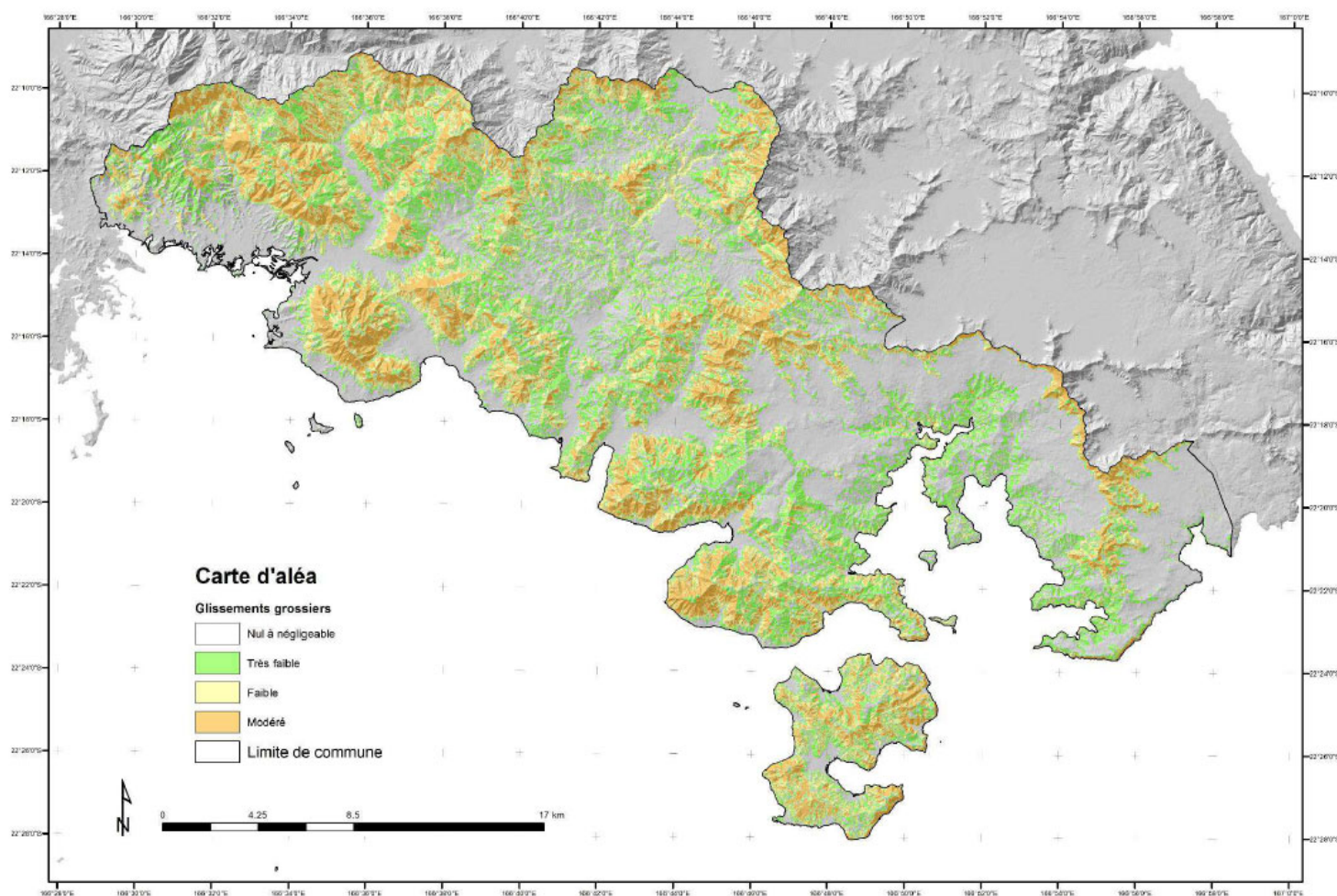
CB

Hazard (1)

		Intensity				
		Extrêmement lent	Très lent qq mm/an	Lent à rapide # qq m/jour	Très rapide # qq m/min	Extrêmement rapide
		Très faible 16 mm/an	Faible 1.6 m/an	Moyenne 3 m/min	Elevée 5 m/s	Très élevée
Reach probability	Négligeable 10-6	Négligeable	Négligeable	Très faible	Faible	Faible
	Très faible 10-5	Négligeable	Très faible	Faible	Modéré	Modéré
	Faible 10-4	Négligeable	Faible	Modéré	Elevée	Elevée
	Moyen 10-3	Très faible	Modéré	Modéré	Elevée	Elevée
	Elevée 10-2	Faible	Modéré	Elevée	Elevée	Très élevée
	Très élevée	Faible	Modéré	Elevée	Très élevée	Très élevée
				GF	GG	LT
				CB Vu [0.25-1 m³]		

Hazard (2)

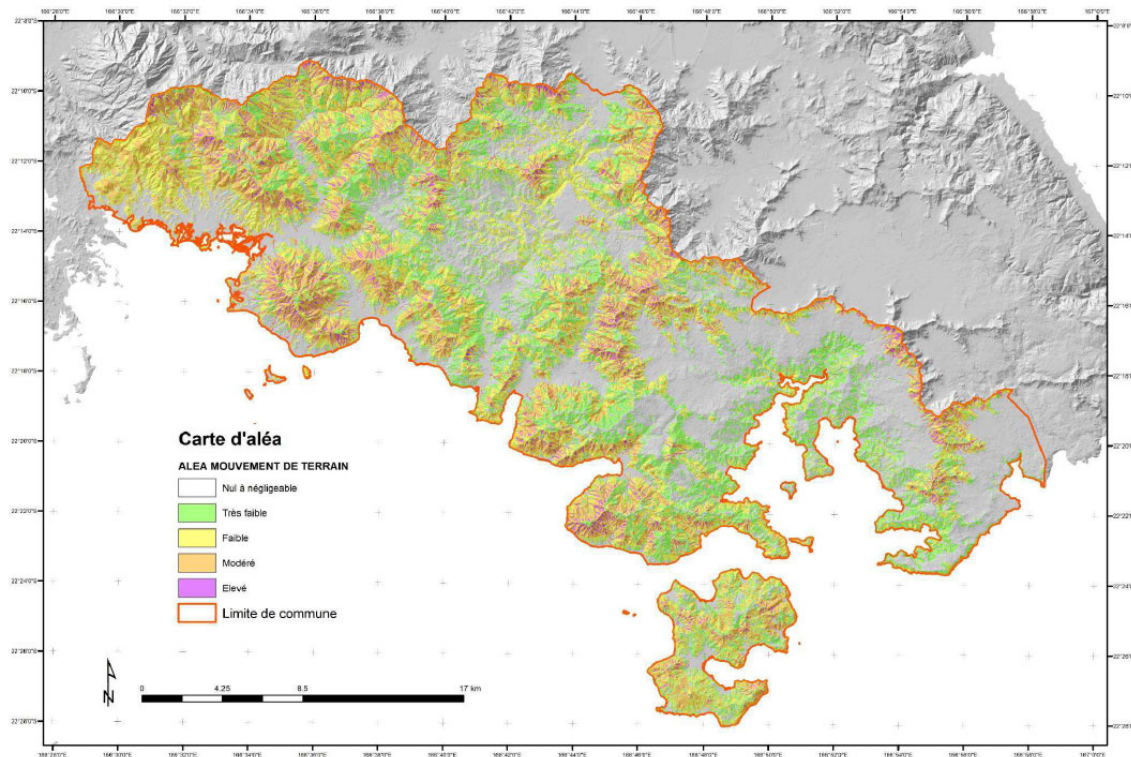
GG >> exemple



Hazard (3)

➔ Final hazard = max (hazard by phenomena)

$$H_{\text{landslide}} = \max (H_{\text{LT}} ; H_{\text{GG}} ; H_{\text{GF}} ; H_{\text{CB}})$$



Surfaces exposées (km²)

		GG	GF	LT	CB	ALEA MVT
Aléa (km²)	Nul à négligeable	260.3	311.1	376.2	478.5	231.2
	Très faible	152.6	98.9	107.6	55.0	121.6
	Faible	114.5	217.3	85.3	47.0	143.6
	Modéré	104.0	4.0	36.3	50.8	108.9
	Elevé	-	-	26.0	-	26.0
	Total "Aléa"	371.0	320.2	255.2	152.8	400.1

Surfaces exposées (% de la surface communale)

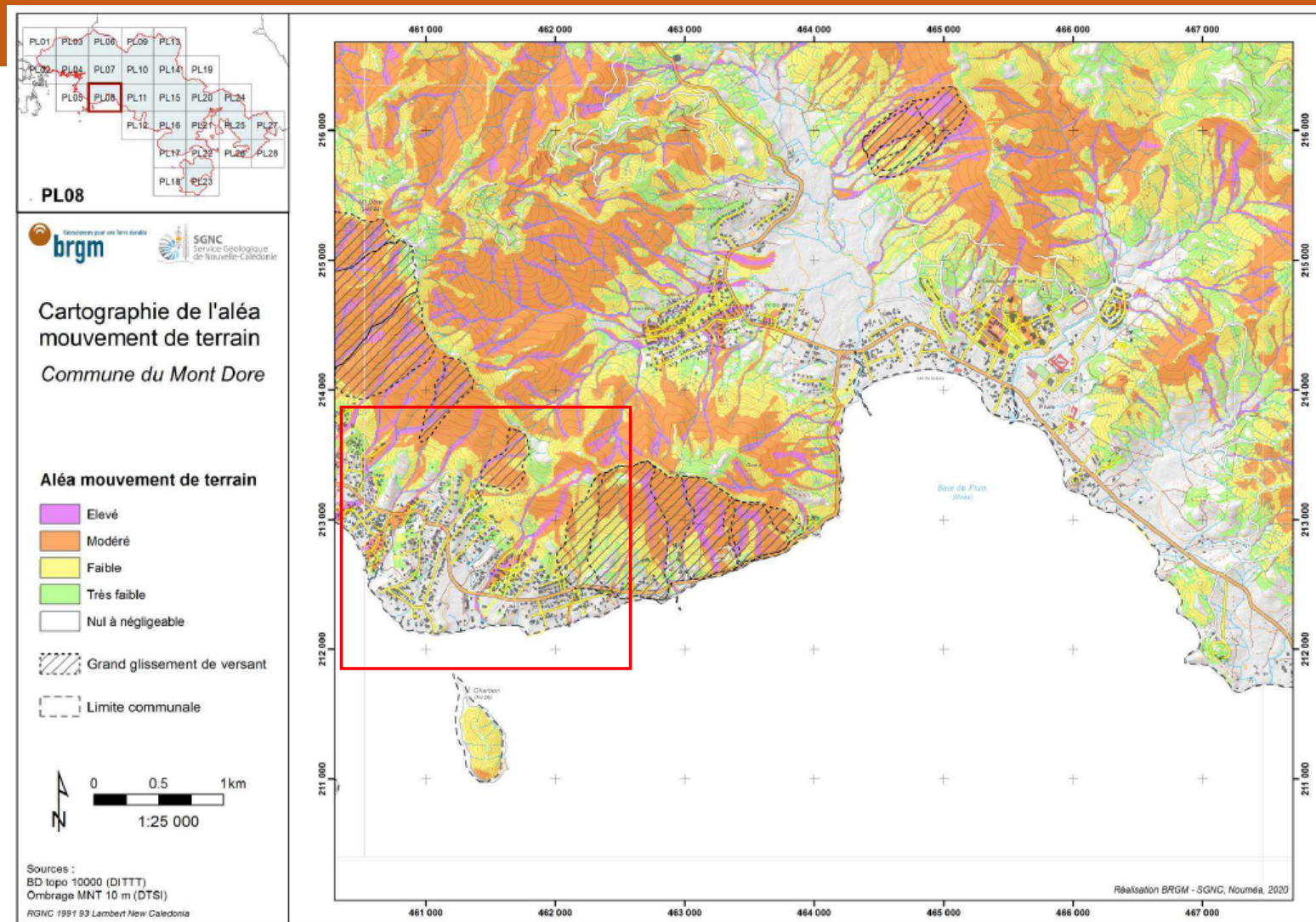
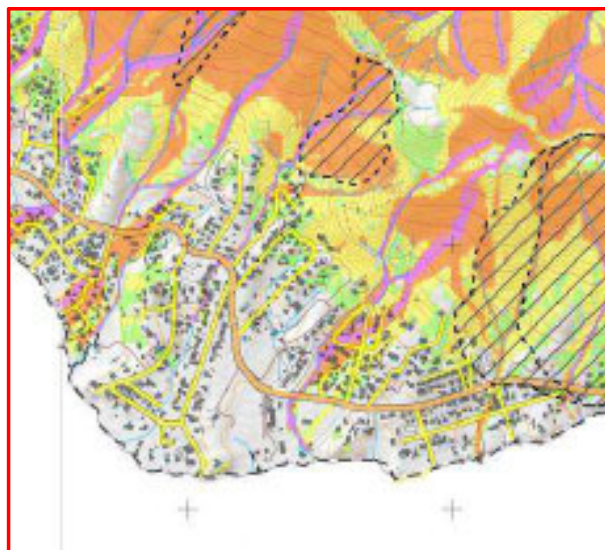
		GG	GF	LT	CB	ALEA MVT
Aléa (% communale)	Nul à négligeable	41%	49%	60%	76%	37%
	Très faible	24%	16%	17%	9%	19%
	Faible	18%	34%	14%	7%	23%
	Modéré	16%	1%	6%	8%	17%
	Elevé	-	-	4%	-	4%
	Total "Aléa"	59%	51%	40%	24%	63%



High level only
for LT

Hazard (4)

Final hazard catalog
of 1/25 000 scale
(all types)



Validation

- **Field survey** based on geologists knowledge of the territory
 - Global accordance confirmed
 - Climatic event post-survey > 2020/2/29 385 mm / 6 hrs → new landslides (LT / GG) observed in the main area defined

- **Back analysis** on events

Pilot area (SC-NI) 50% of events
Pilot area (SC-NII) all events
Whole area (SV)

Taux de reconnaissance calculé en
agrégeant les classes "très forte", "forte"
et "modérée"

Type	SC-I	SC-NI	SV
GG	92.9%	93.2%	94.4%
GF	76.0%	74.5%	65.2%
LT	81.8%	73.0%	76.1%
CB	94.7%	87.5%	94.9%

Taux de "non-reconnaissance" (classe
"très faible")

Type	SC-I	SC-NI	SV
GG	1.4%	1.4%	1.4%
GF	5.0%	3.5%	5.4%
LT	4.4%	2.1%	4.0%
CB	0.0%	0.0%	2.6%

- **Comparison with existing** local maps >> difficult because very <> methods !
 - ... but good agreement regarding main envelopes because
new moderate classes impose main regulatory in land planning

Perspectives

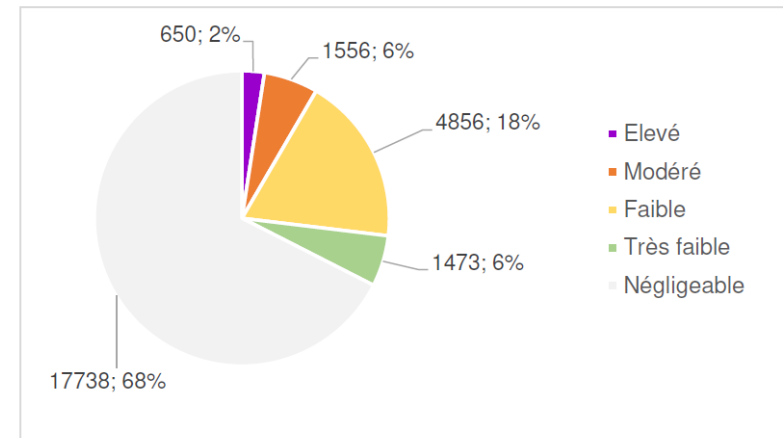
○ 1st evaluation of risk for buildings

- Simple cross between hazard & presence of buildings
- No vulnerability assessment

○ Next step

- 1st recommendations for land planning regarding landslide hazard

Niveau d'aléa	Nombre de bâtiments	Pourcentage du parc bâti
Elevé	650	2%
Modéré	1556	6%
Faible	4856	18%
Très faible	1473	6%
Négligeable	17738	68%
Total général	26273	100%



Towards a quantified and global landslide hazard assessment for New Caledonia (South pacific) in a regulatory mapping context

EGU21 - 7862

Thanks for your attention

