

Laboratoire Navier

20 Novembre 2023

Emmanuel Keita

La construction en terre crue : Caractérisation

Plan

1) Contexte

2) Nature des terres

3) Interaction avec l'eau

Sondage

Quelle est la part de la population mondiale vivant dans une habitation en terre crue ?

La construction en terre dans le monde



1/3 de la population vit dans une construction en terre crue
1/2 de la population dans une habitation contenant de la terre crue
17% du patrimoine classé à l'UNESCO est en terre crue

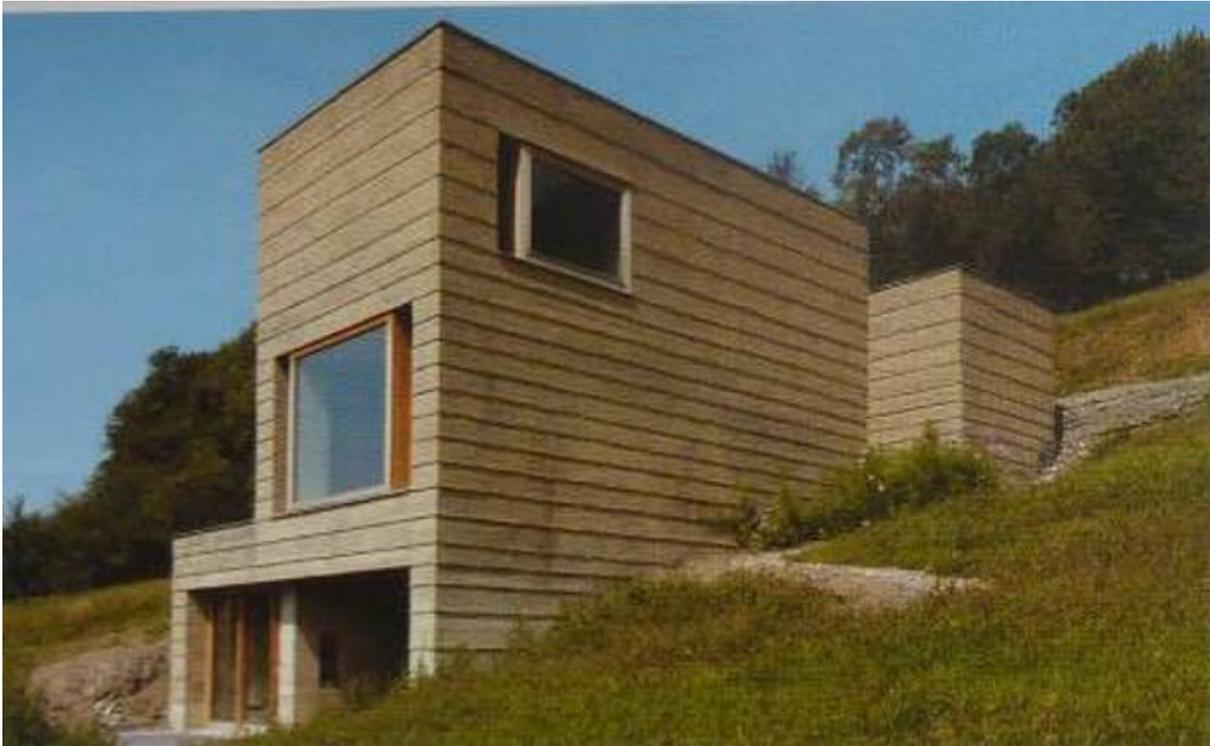
Craterre



En France



- Shibam, Yemen – XVIe siècle
- 500 immeubles, jusqu'à 8 étages et 30 mètres de hauteur



Un intérêt renouvelé en architecture

Martin Rauch, Austria



Architecte: A. Morand; terre pisé à Montbrison

Photo Emmanuel Mille



Mur de 20 m de haut, Lyon

Emissions de CO2

- Secteur de la construction
- Réduire les émissions de CO2
- Ciment
 - Réaction chimique CaCO_3
 - Chauffage à 1000°C
- Construction en terre
 - Peu de procédés
 - Pas de réaction chimique

Graphique 2 : décomposition par produit de l'empreinte carbone de la France en 2018

En millions de tonnes de CO2 eq



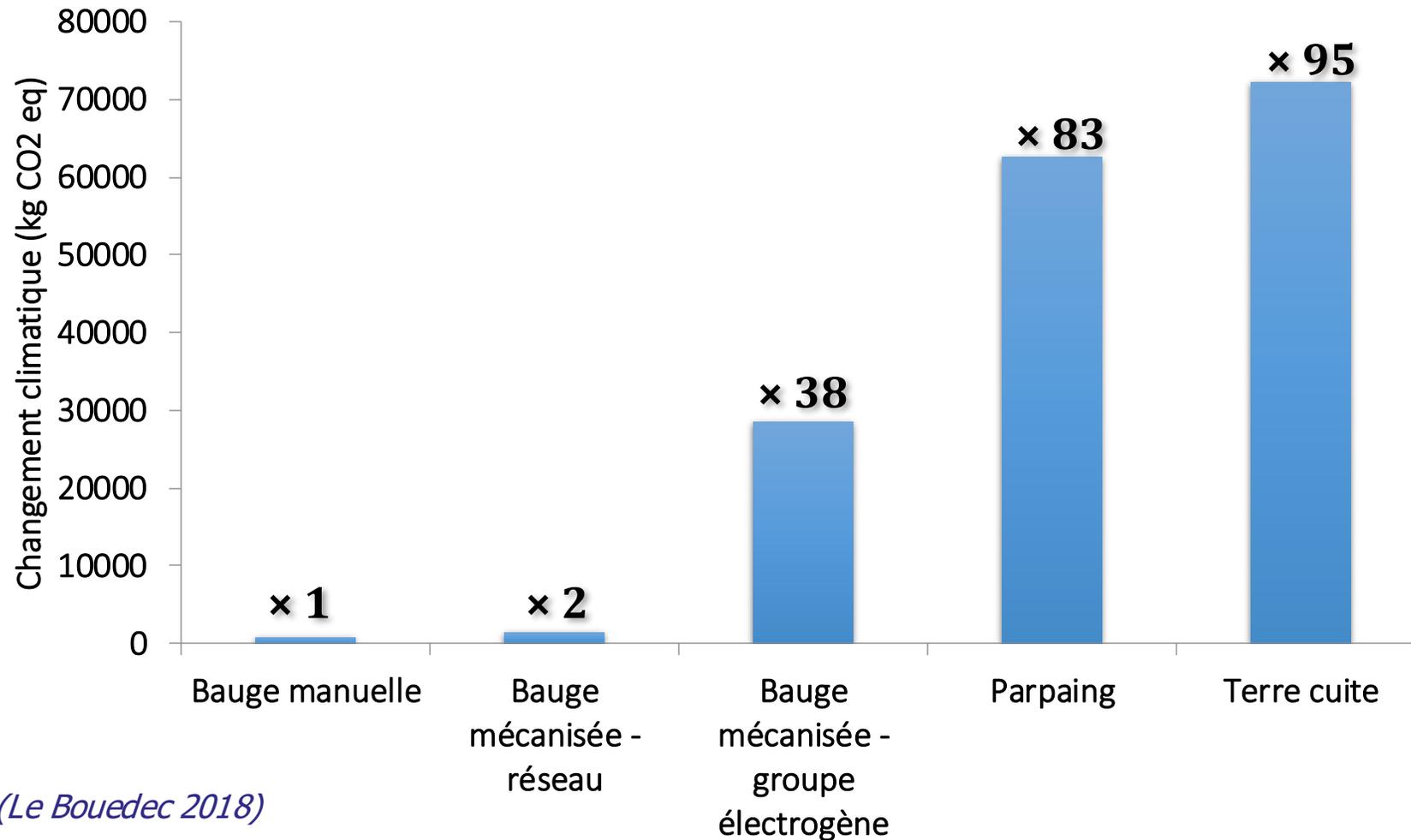
Note : GES pris en compte : CO_2 , CH_4 et N_2O .

Champ : France métropolitaine + Drom (périmètre Kyoto).

Sources : Citepa ; AIE ; FAO ; Douanes ; Eurostat ; Insee.

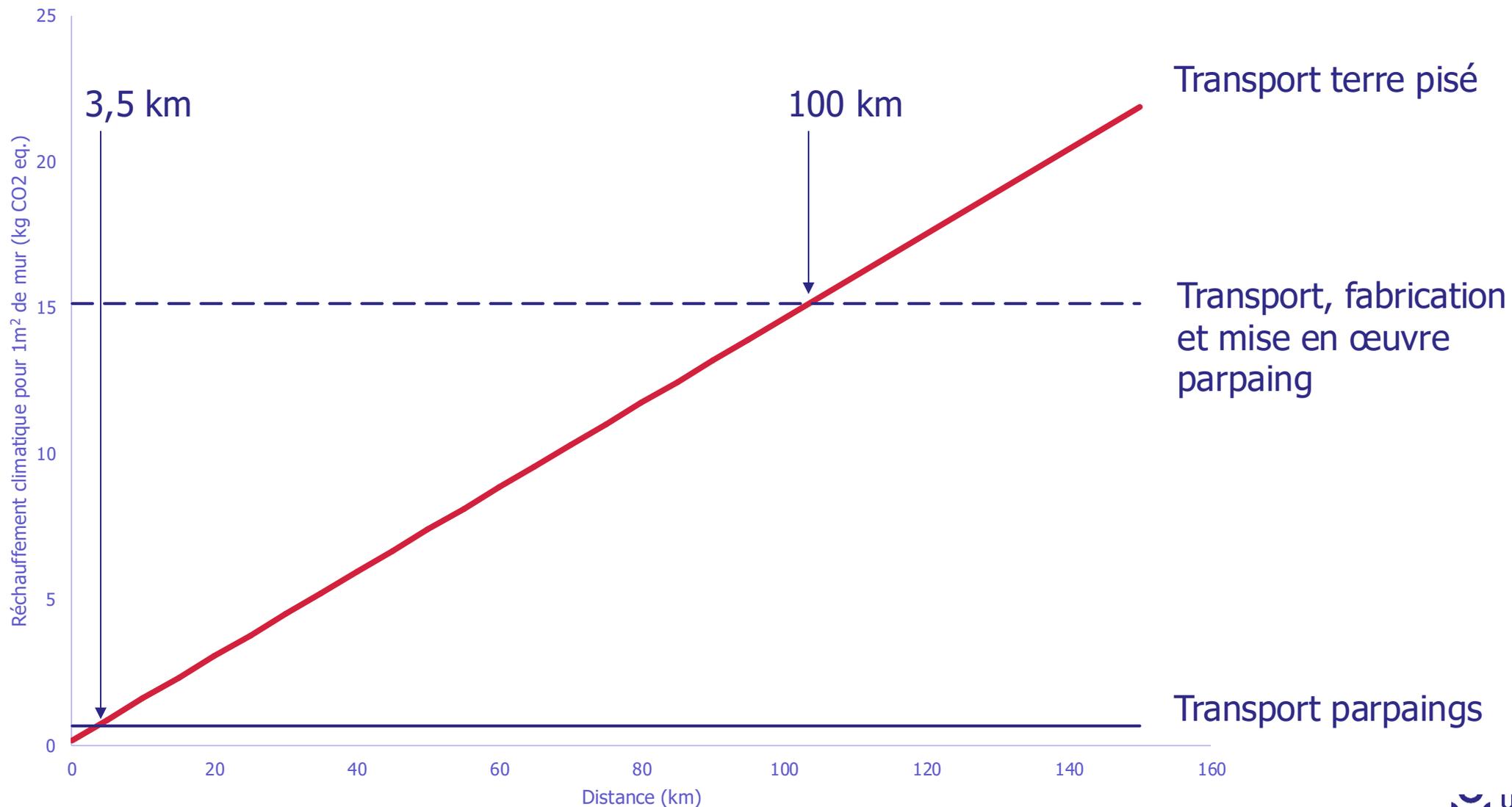
Traitements : SDES, 2019

Un procédé bas carbone



(Le Bouedec 2018)

Effet du transport



(CSTB, 2019)

(CERIB, 2017)

Disponibilité des ressources

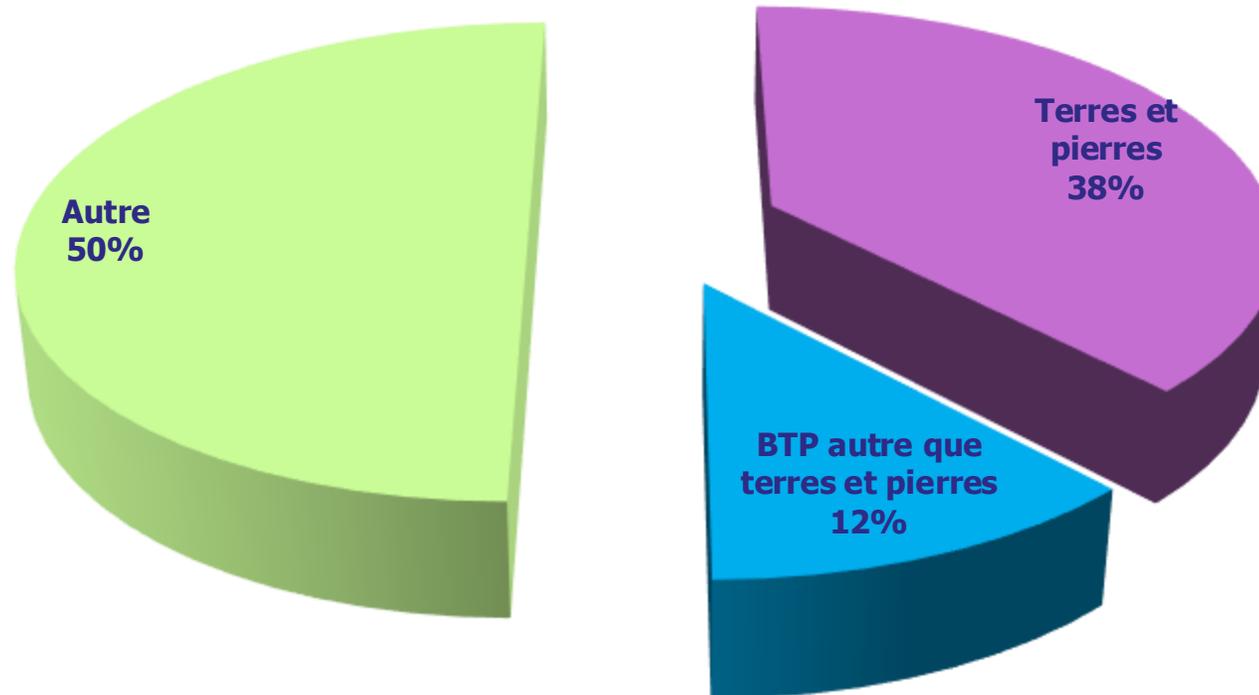
En France :

- 200 millions tonnes de granulats concassés / an
- 40 millions de tonnes de terre excavées /an



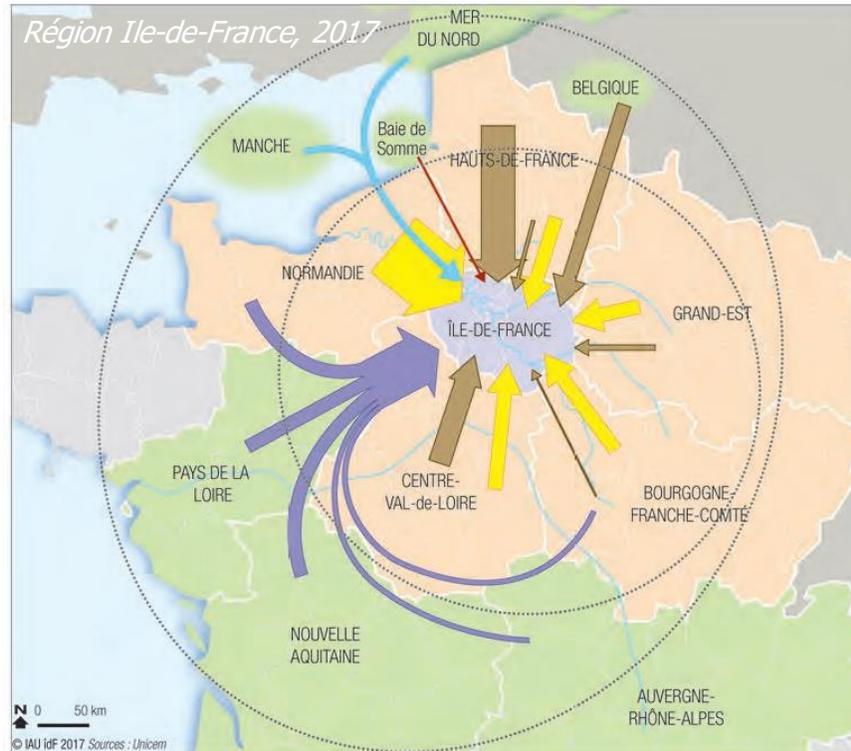
Le déchet les plus abondant

Déchets de l'UE



(Llatas 2011)

Vers une économie circulaire



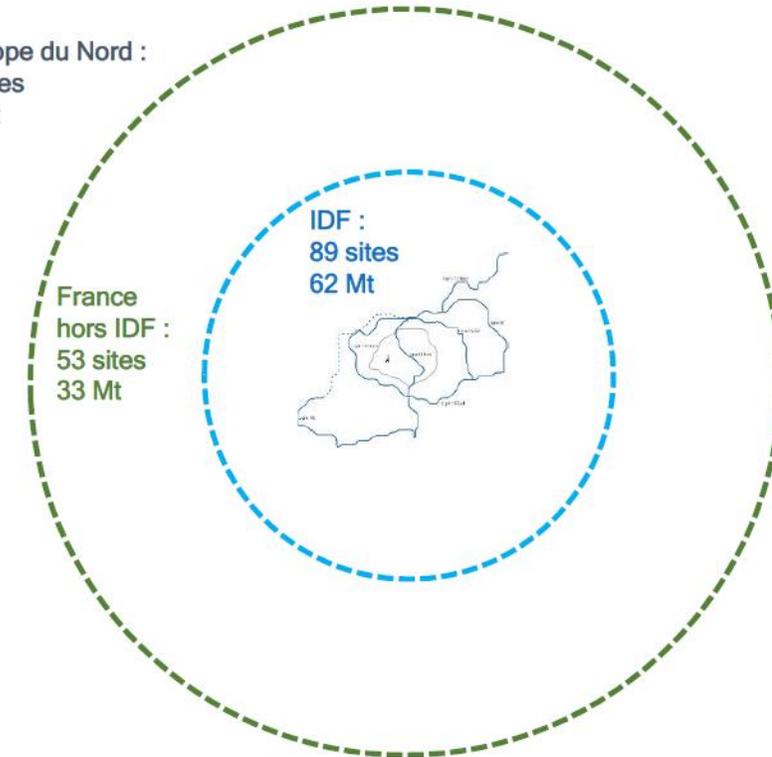
Les 3 cercles d'approvisionnement

- 1^{er} cercle : région Île-de-France
- 2^e cercle
- 3^e cercle

Apports extérieurs à l'Île-de-France

- alluvionnaires — supérieur à 50%
- marins
- cordons littoraux
- roches calcaires - environ 30 %
- roches éruptives - inférieur à 20 %

Europe du Nord :
8 sites
3 Mt



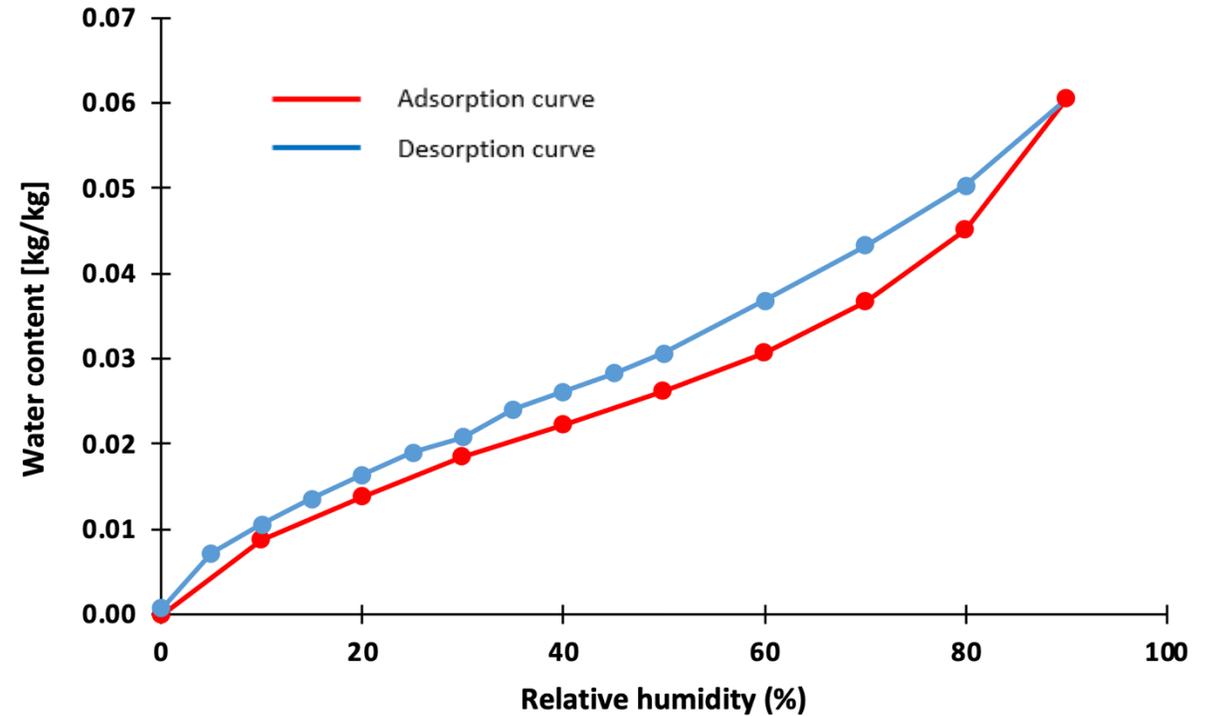
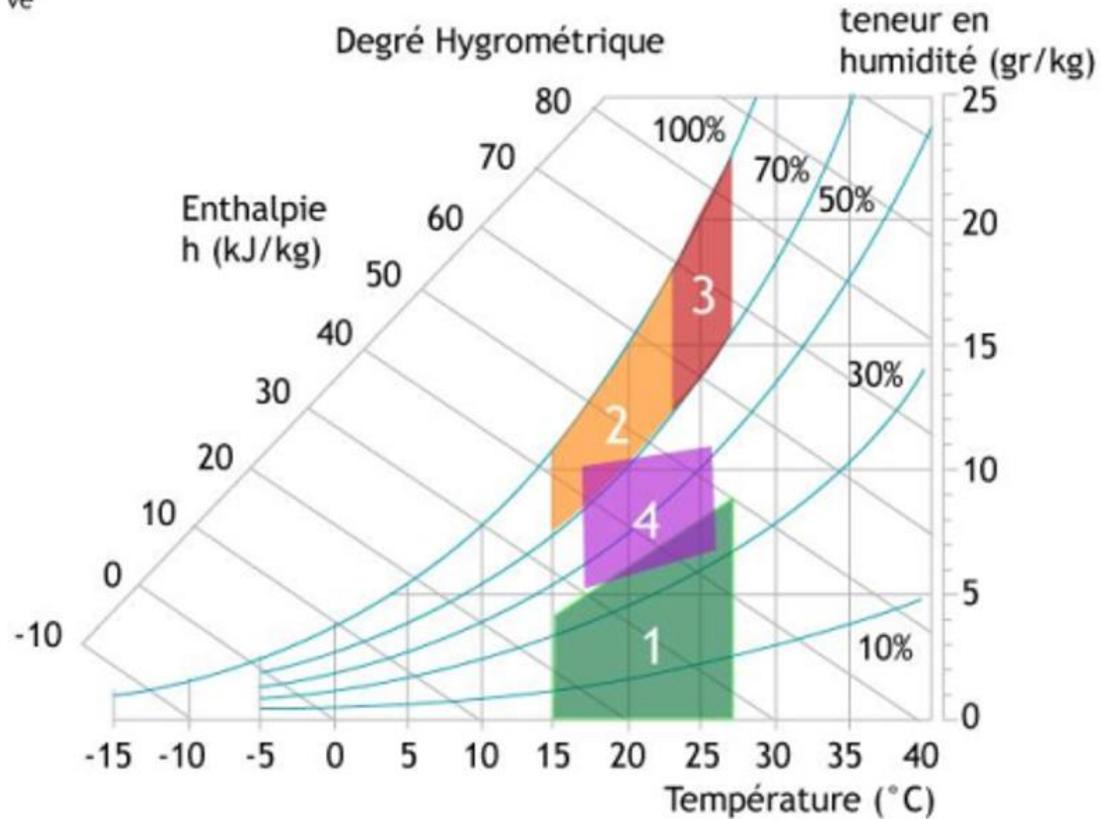
Société du Grand Paris, 2017

Consommation annuelle de granulats de la région Ile-de-France, 26,3 Mt dont 11,9 Mt importés

Site de valorisation identifiés par le SGP pour l'élimination de terres d'excavation du Grand Paris Express

Adaptation au changement climatique

ve



J. Tourtelot, PhD Thesis

- Confort thermique dépend de l'humidité
- Argiles agissent comme un tampon hydrique

Nature des terres

Sondage

- La résistance des argiles est due à : (choix multiple)
- une réaction chimique
- la présence d'eau
- les charges électrostatiques
- le pH





Béton



Terre crue

$$\phi_{max} \approx 90\%$$



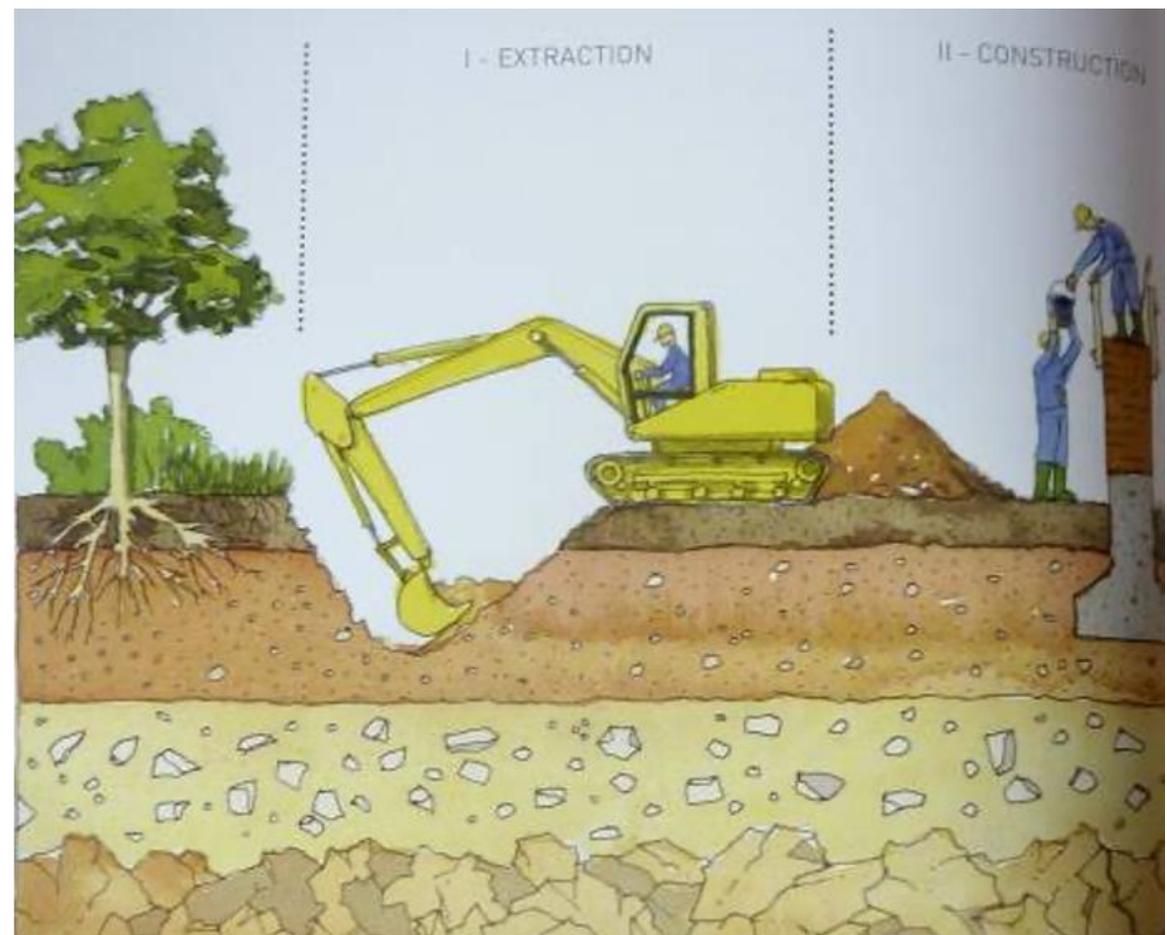
Pebbles
> 20 mm

Gravel
20 - 5mm

Sand
5 - 0.06 mm

Silts
60 - 2 μ m

Clays
< 2 μ m



Mesure de la taille des particules

Granulométrie par tamisage

- Separate the particles of the 200g sieve and keep washing this amount of water until the water turns clear.
- For the particles $> 63\mu\text{m}$, put in the oven at 105°C
- Weigh these particles
- Apply granulometry by sieving with different opening diameters. Sieves dimensions: $\{0.2, 0.125, 0.063\}$ mm.
- After each sieving, weigh the masses



Granulométrie par sédimentation

- For the particles $< 63\mu\text{m}$
- Mélange avec sodium hexametaphosphate
- Start the sedimentation and measure the turbidity at 30mn, 1h, 2h, (4m)

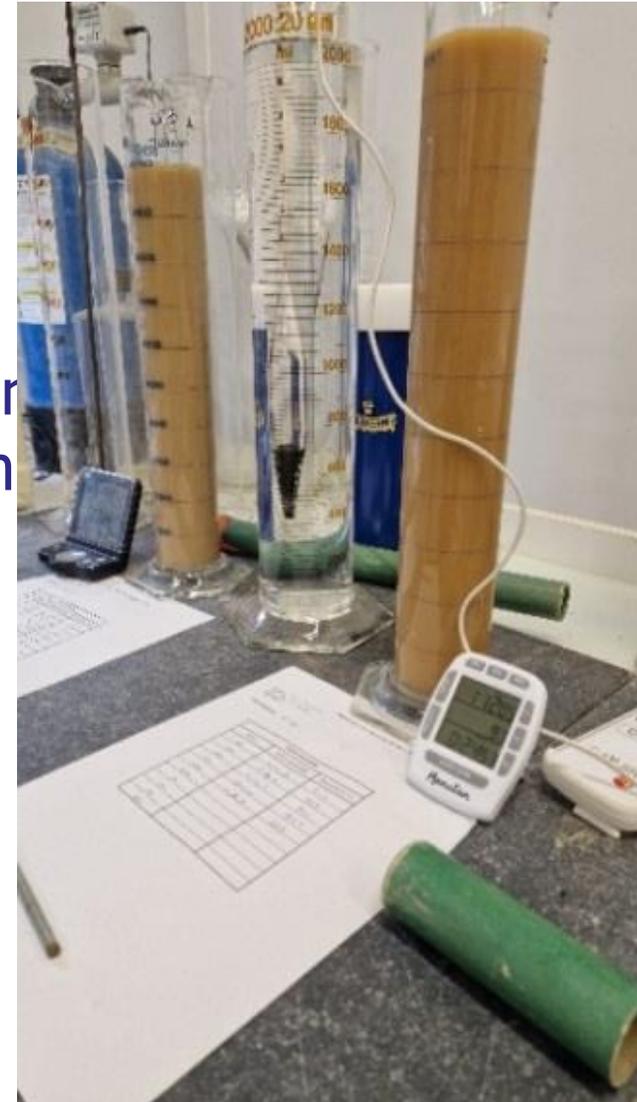
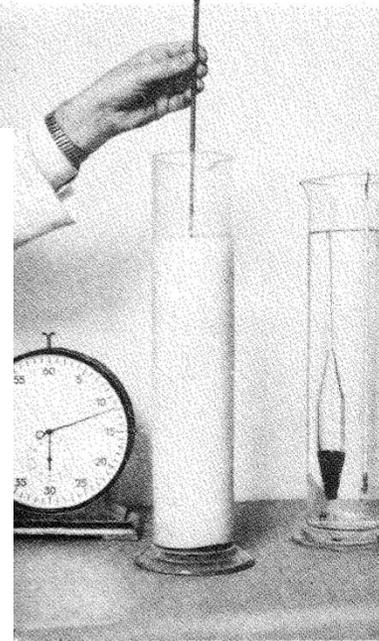
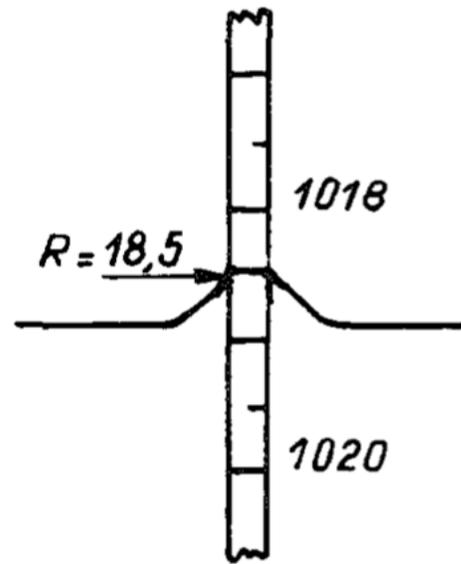
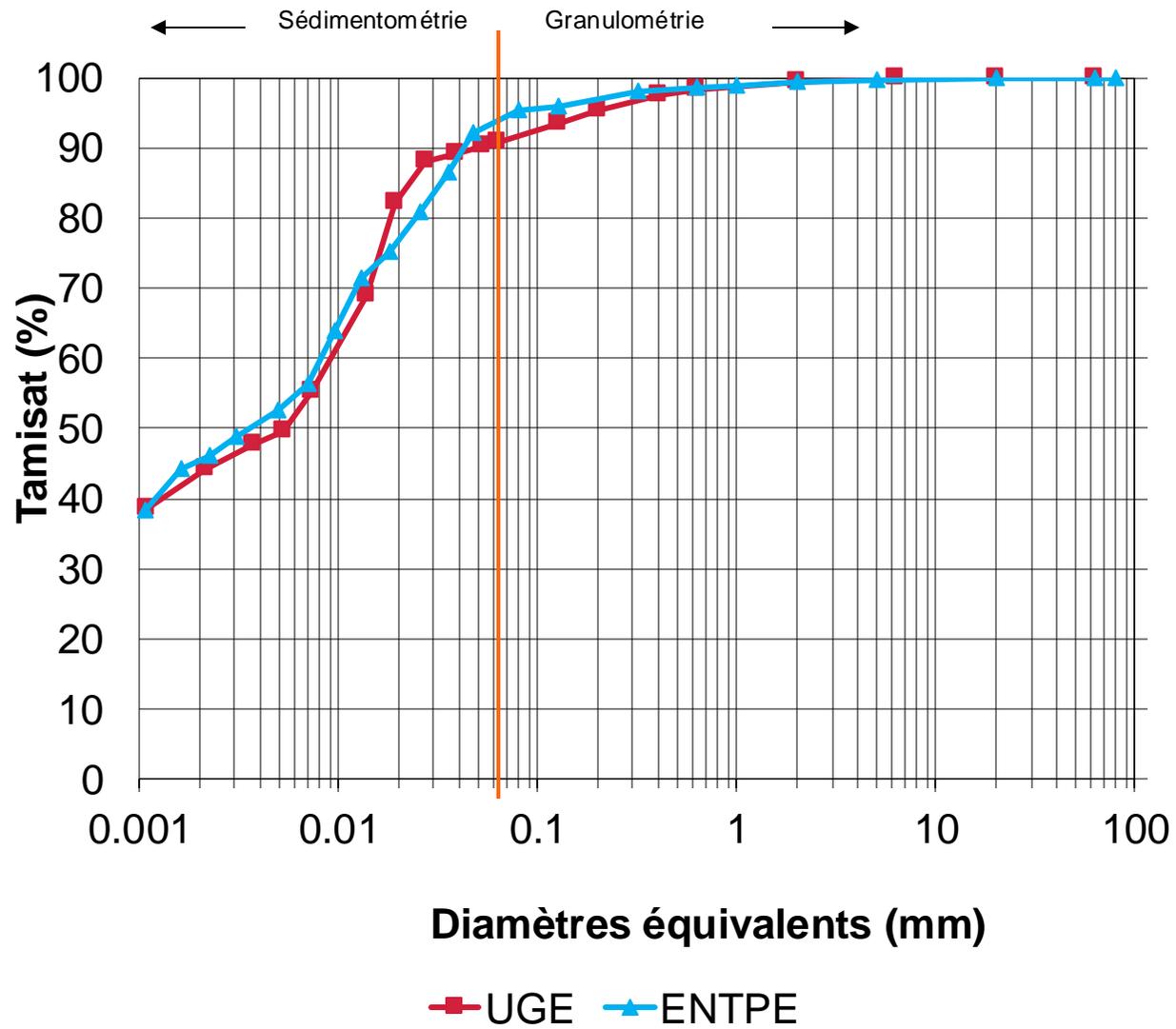


FIG. 8 bis.





Valeur de bleu

- Surface spécifique
- Concentration de la solution de bleu de méthylène : 10g/l



Type de sol	Valeur de bleu (g/100g)
Sables purs	0 – 0,5
Sables limoneux	0,5 – 2,0
Limons	2,0 – 4,0
Argiles faiblement actives	4,0 – 7,0
Argiles moyennement actives	7,0 – 10,0
Argiles fortement actives	>10,0



Valeur de bleu

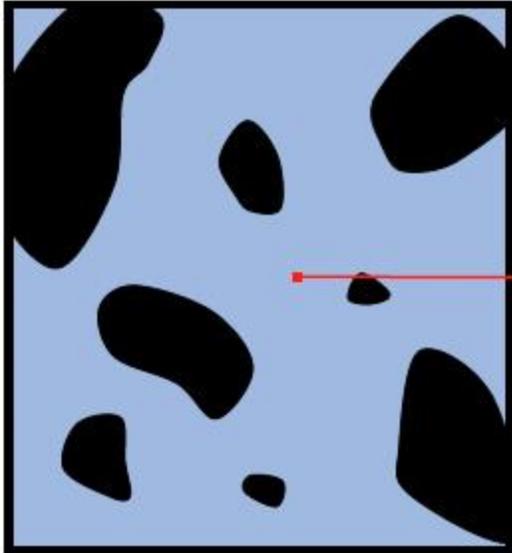
- Surface spécifique
- Concentration de la solution de bleu de méthylène : 10g/l

Type de sol	Valeur de bleu (g/100g)	Interprétation
Sables purs	0 – 0,5	Très faible adsorption, peu ou pas d'argiles.
Sables limoneux	0,5 – 2,0	Faible proportion de particules fines.
Limons	2,0 – 4,0	Présence modérée de fines argileuses.
Argiles faiblement actives	4,0 – 7,0	Faible activité (kaolinite, illite).
Argiles moyennement actives	7,0 – 10,0	Activité intermédiaire.
Argiles fortement actives	>10,0	Forte activité (montmorillonite, smectites).

Caractérisation minéralogique

Matériau multi-échelle

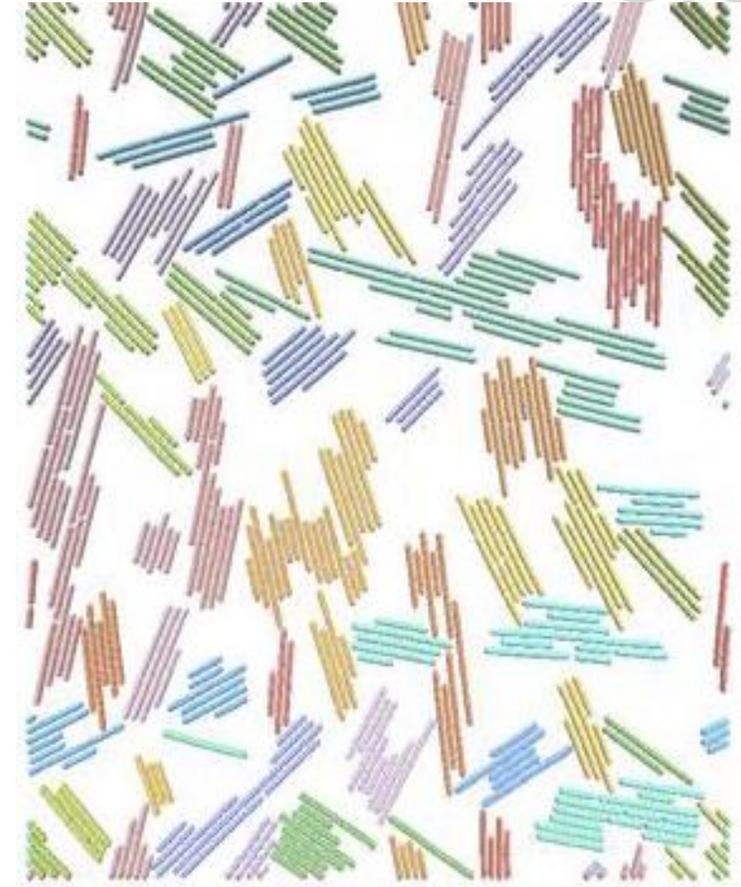
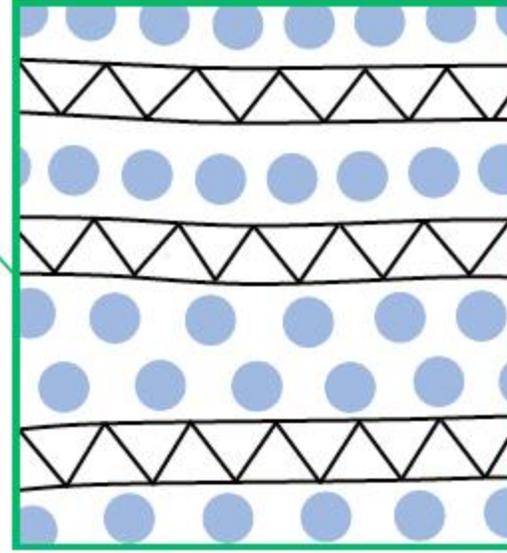
Clay matrix and inclusions
(10 – 100 μm)



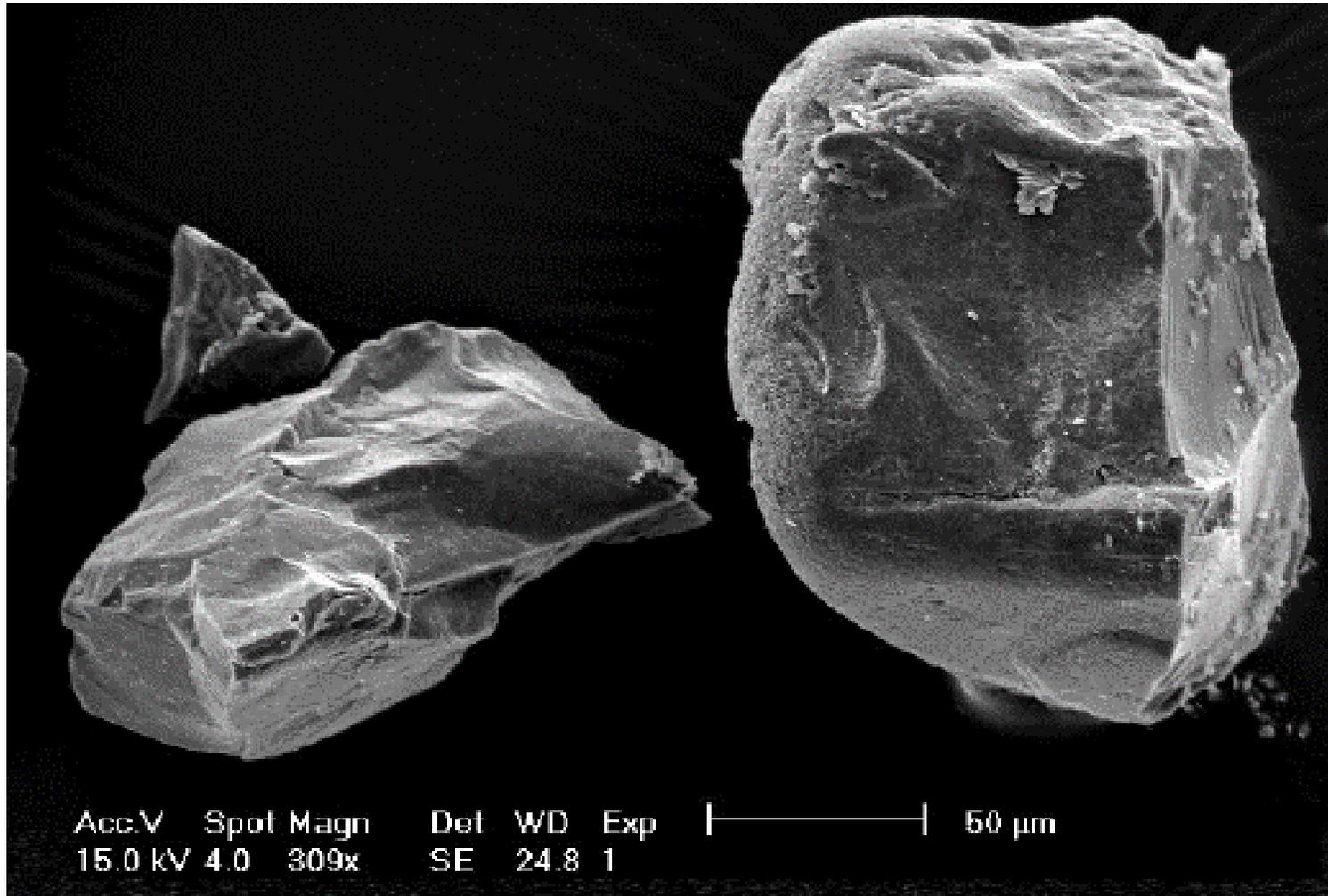
Stacks of layers
(0.1 – 1 μm)



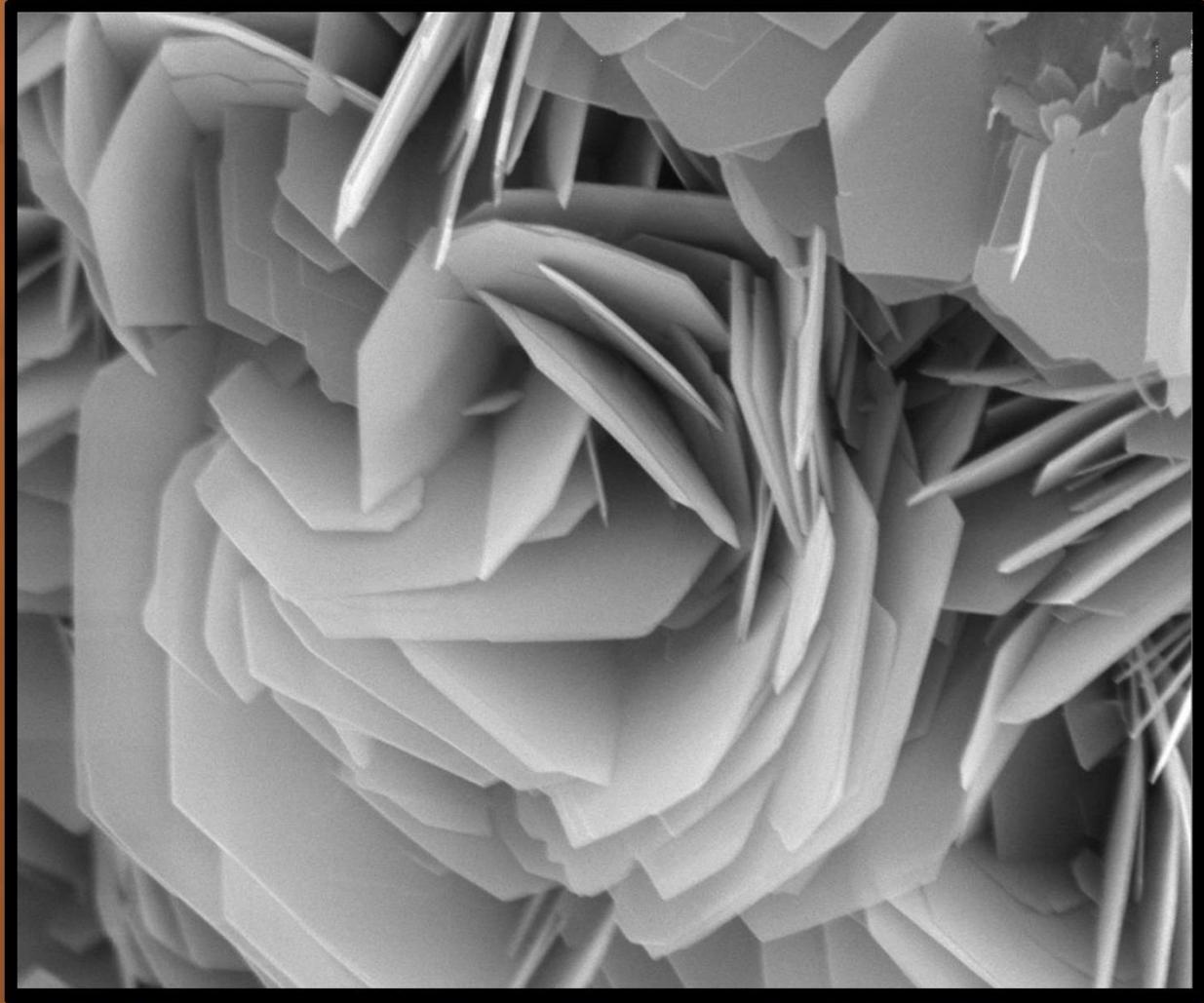
Clay layers
(~ 10 nm)



Grains

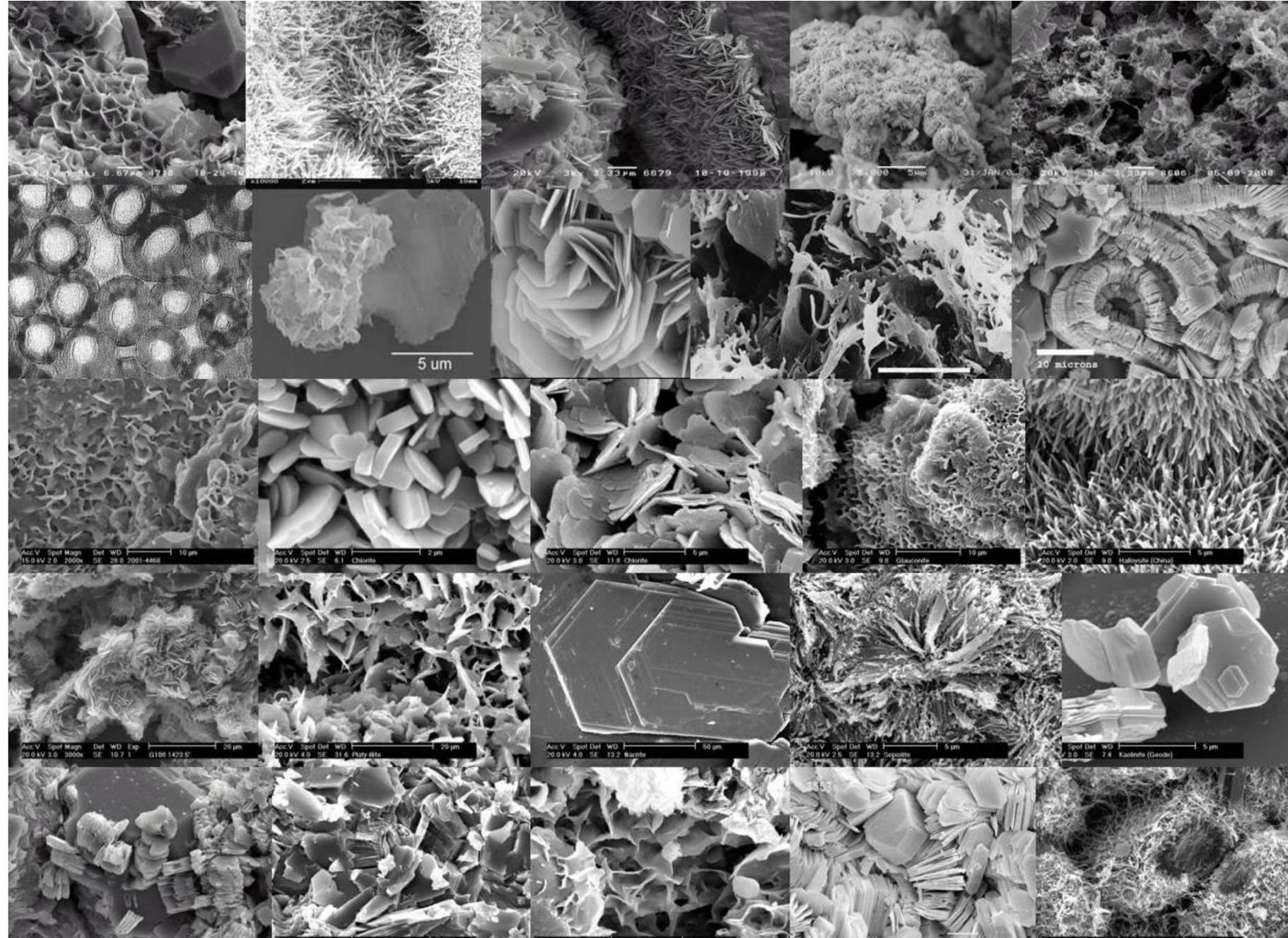


Structure

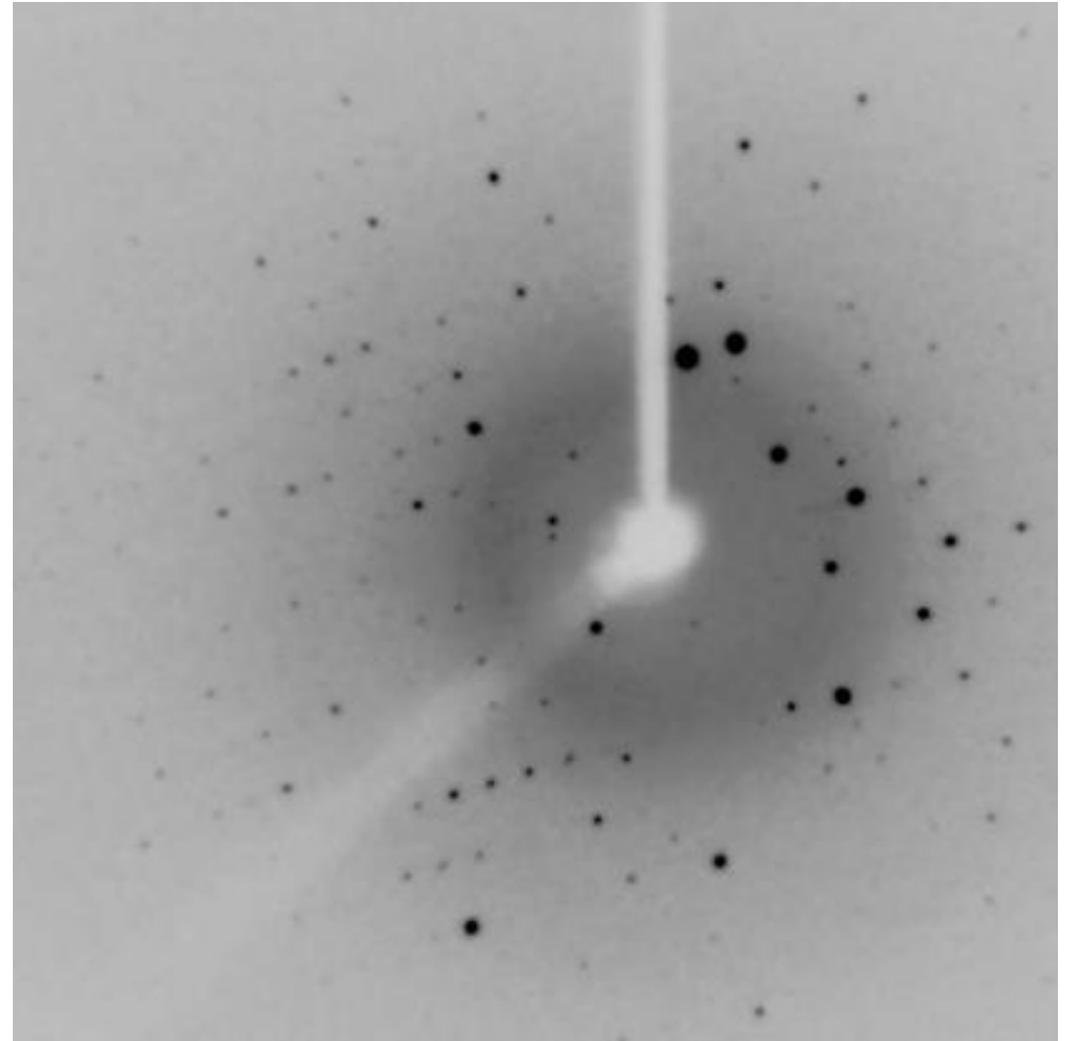
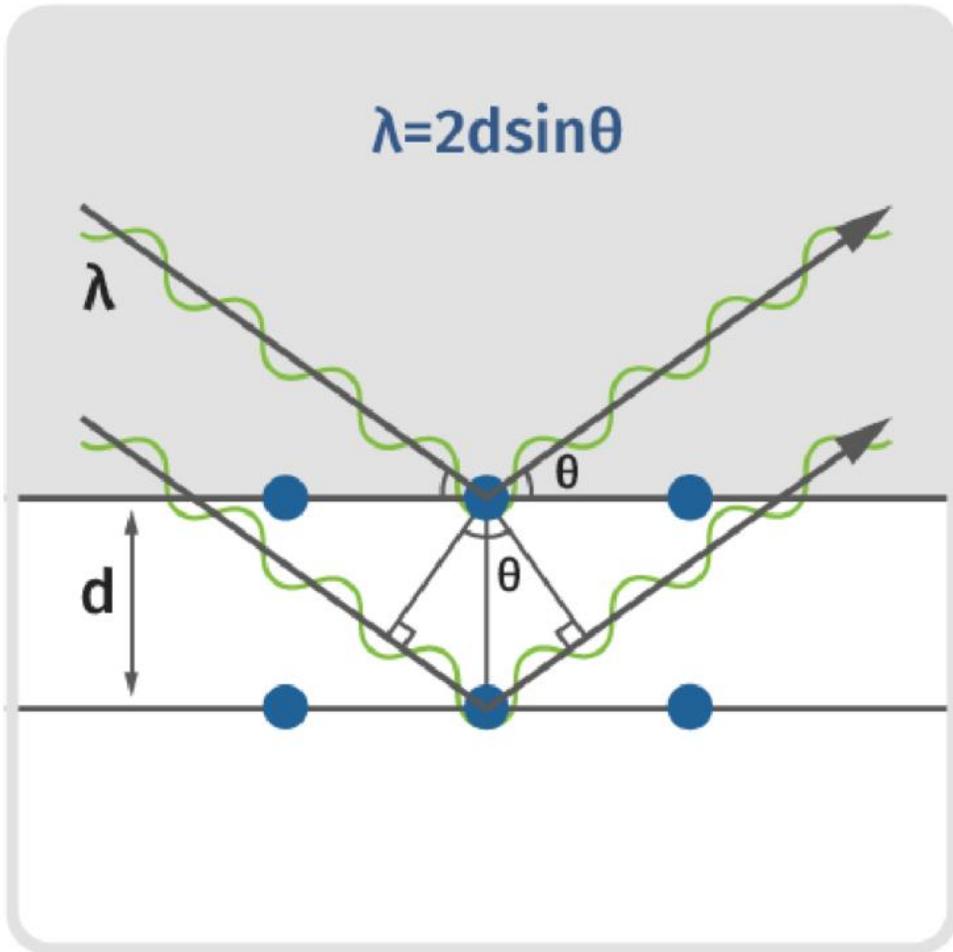


< 0,002 mm

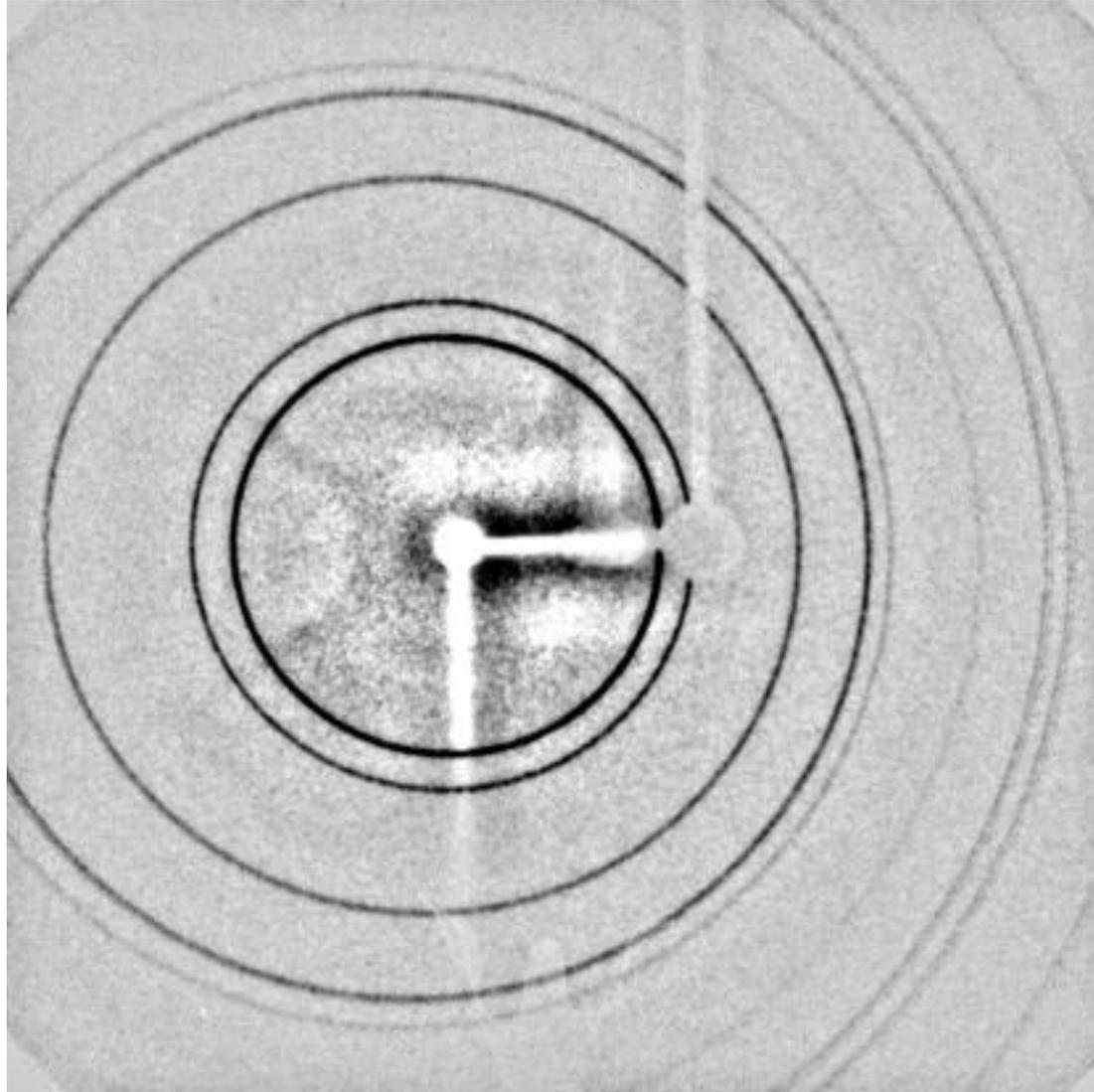
Très grande variété

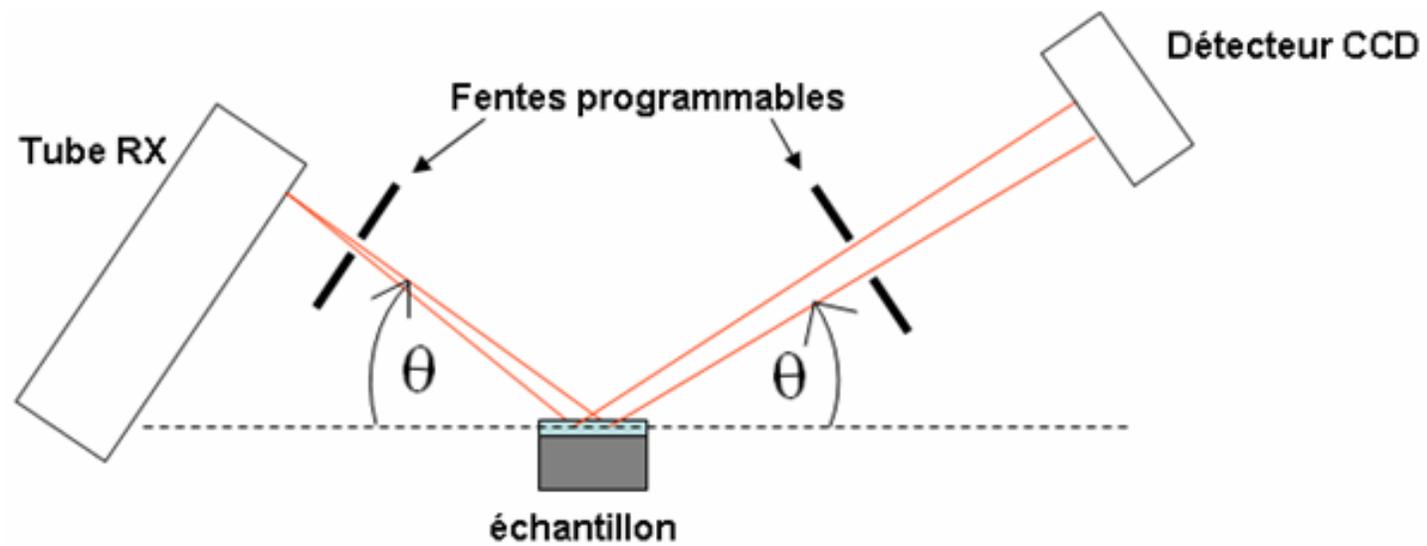
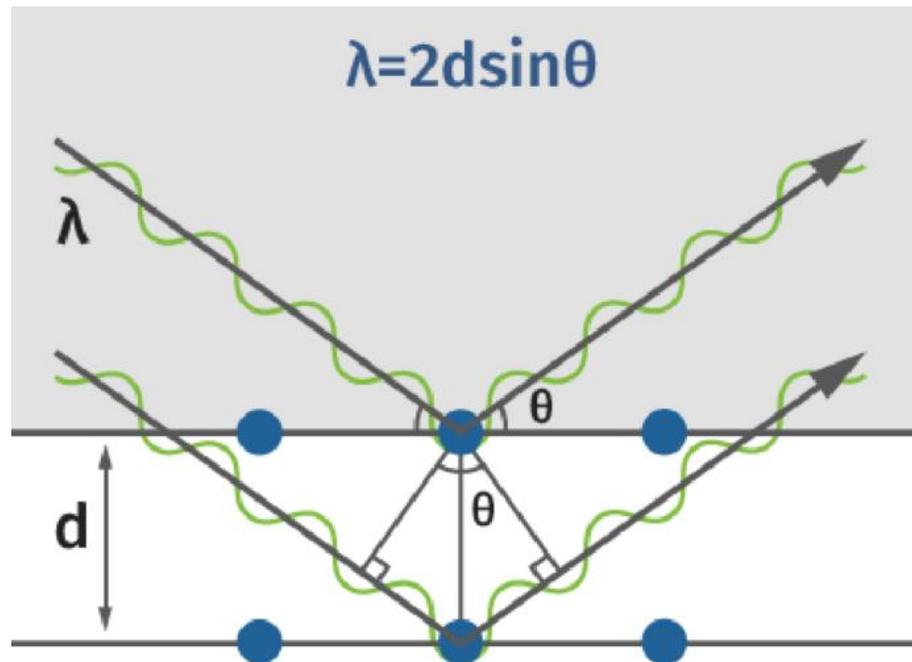


Diffraction des rayons X

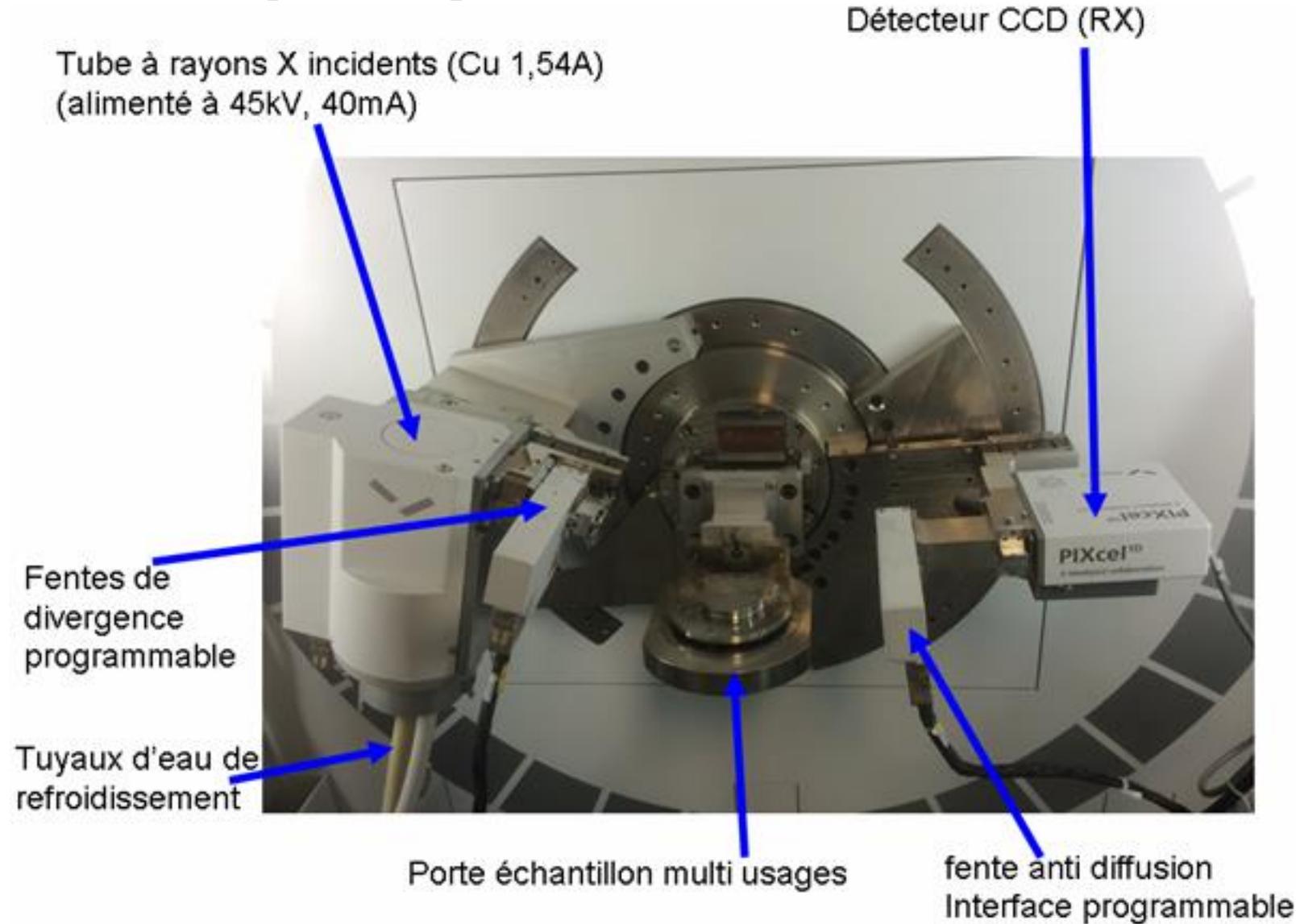


Diffraction des poudres

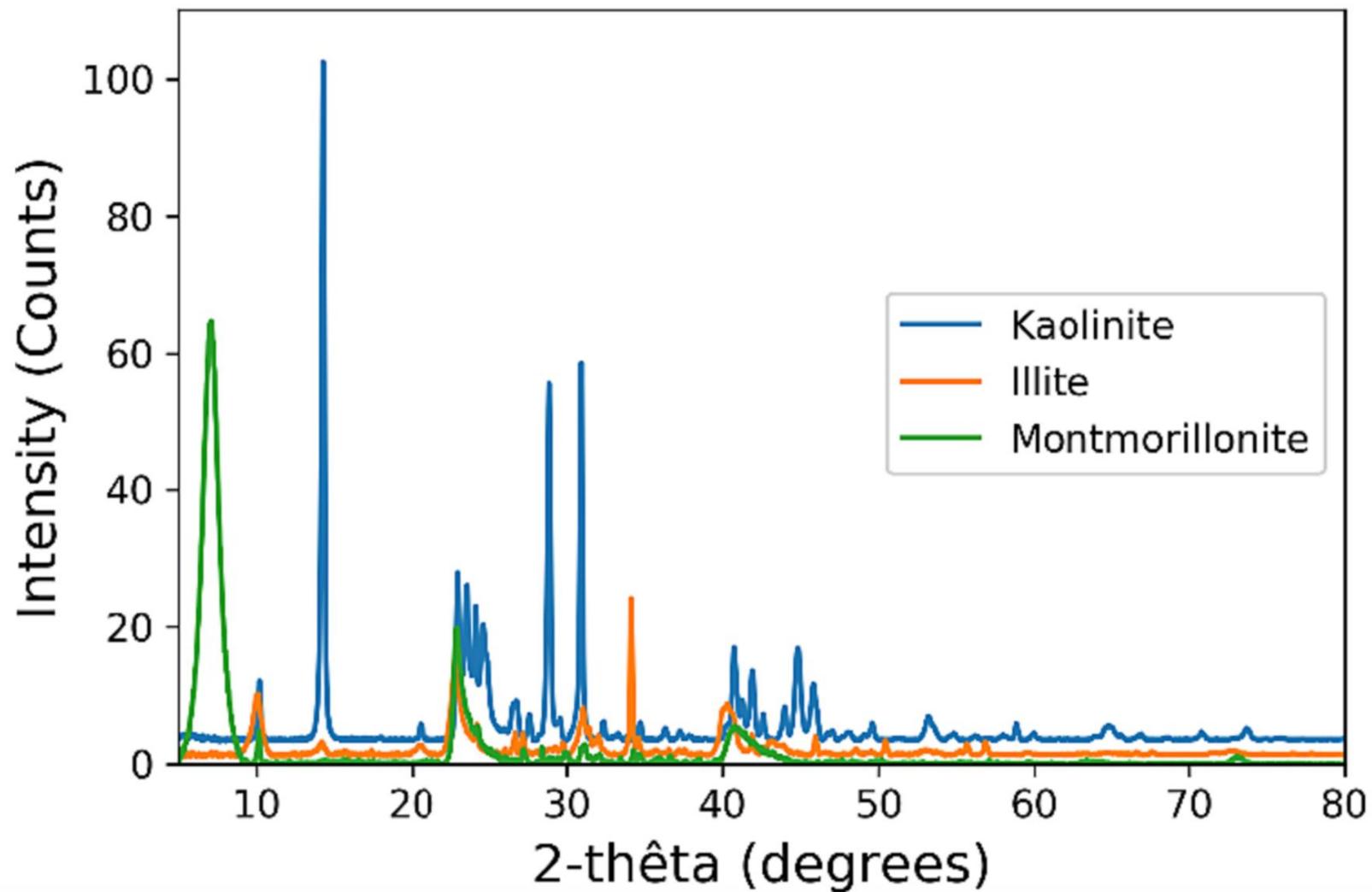




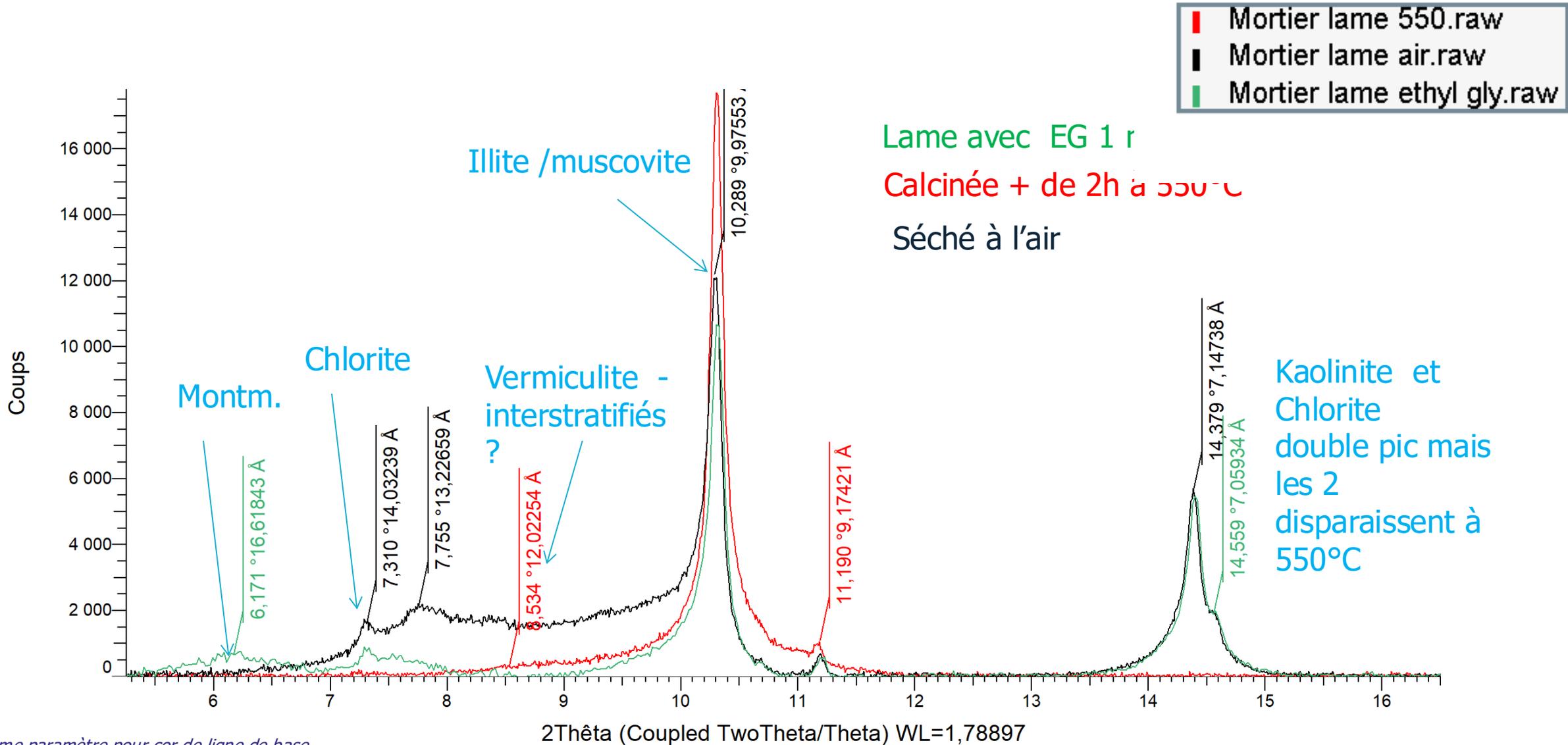
Diffraction par rayon X



Diffractogramme

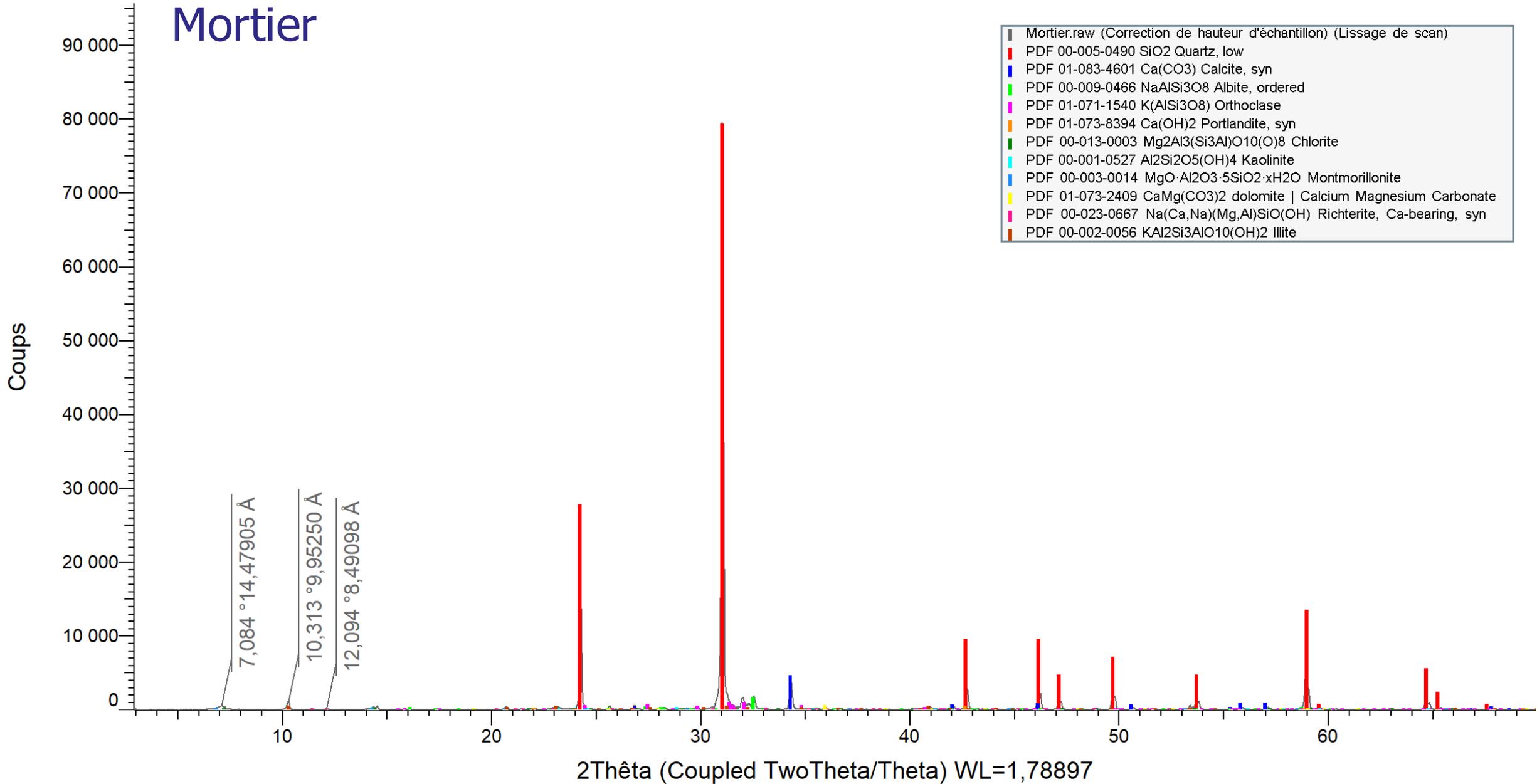


DRX sur lames orientées pour identifier les argiles



Meme paramètre pour cor de ligne de base

Mortier



Analyses Rietveld - TOPAS - Terre crue $R_{WP} = 6,38$

TOPAS - C:\Users\thesardmg\Documents\2023 MORTIER GHIDA SARA\2023 SaraLAST

File View Fit Launch Tools Window Help

Terre crue.raw_1

- Emission Profile
- Background
- Instrument
- Corrections
- Miscellaneous
- Structures/hkl Phases
 - Quartz
 - Cristobalite low
 - Magnetite
 - Hematite
 - Portlandite
 - Wuestite

Paste INP to Node/Selections

Use	Value	Code
Chebychev	<input checked="" type="checkbox"/>	@
Order	5	
1/X Bkg	<input checked="" type="checkbox"/>	6935.934 @

Chebychev Coefficients		
Coefficient	Error	
1	982.6132	0
2	-536.954	0
3	241.9293	0
4	-195.6738	0
5	166.128	0
6	-74.0113	0

Quartz	62.57 %
Calcite	0.12 %
Illite	5.25 %
Microcline intermediate1	4.37 %
Chlorite IIb	0.57 %
Muscovite 2M1	8.19 %
Albite	7.51 %
Microcline maximum	2.53 %
Kaolinite (BISH)	5.33 %
Orthoclase	1.88 %
Montmorillonite	1.69 %

Number of equivalent positions 1

0	Time	0.16	Rwp	6.384	0.000	MC	0.00	0
1	Time	0.45	Rwp	6.383	-0.001	MC	0.67	3
2	Time	0.67	Rwp	6.382	-0.001	MC	0.53	2
3	Time	0.89	Rwp	6.382	-0.001	MC	0.46	2

--- 0.887 seconds ---

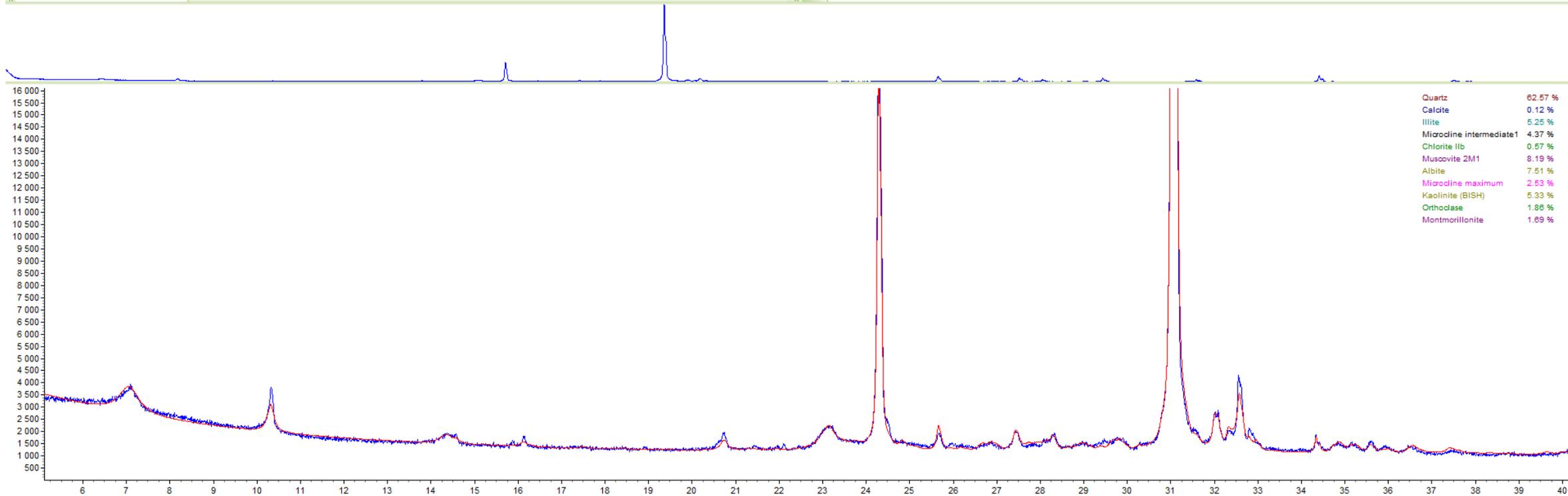
*** Parameter(s) close to limit(s).
Check for LIMIT_MIN and LIMIT_MAX in Grid/Text

Errors calculated

Interface Mode

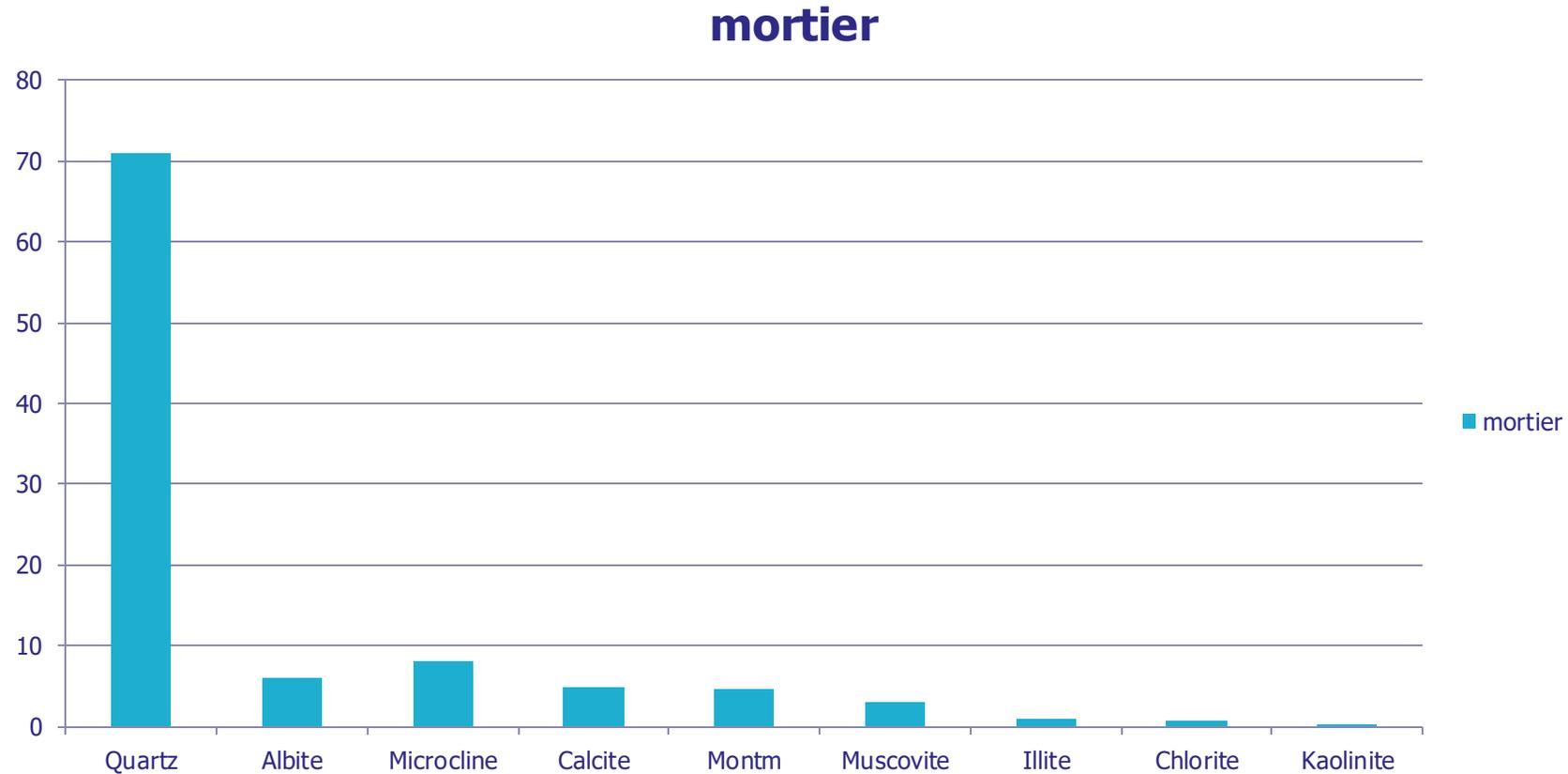
TOPAS

Refinement converged: Keep refined parameter values?
Inspect parameters and graphics before answering.



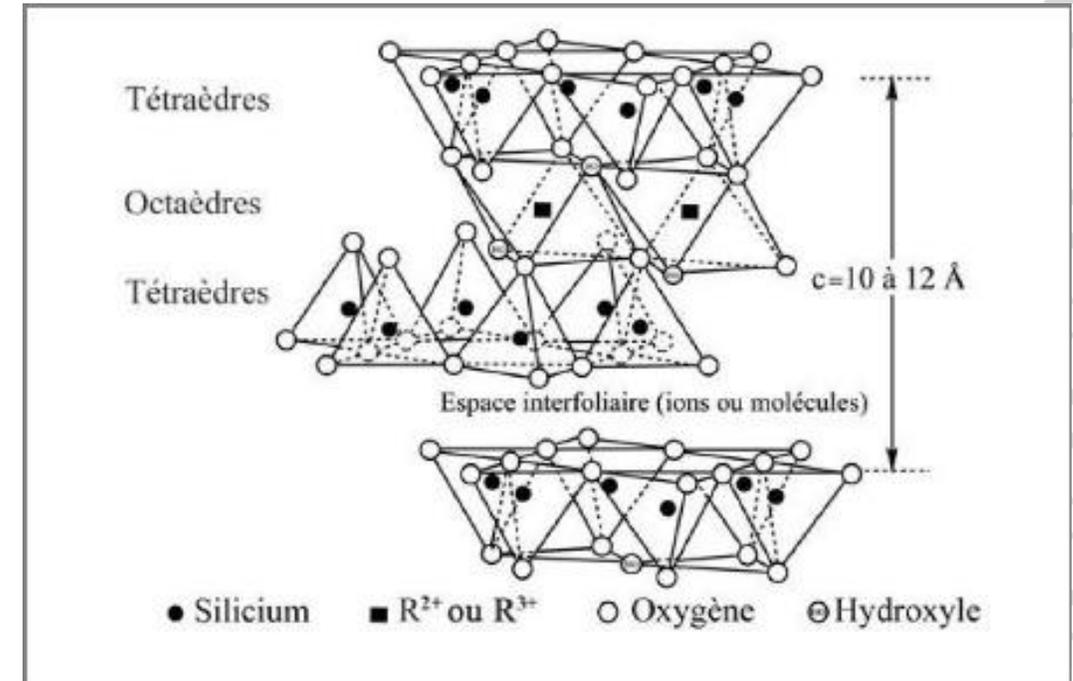
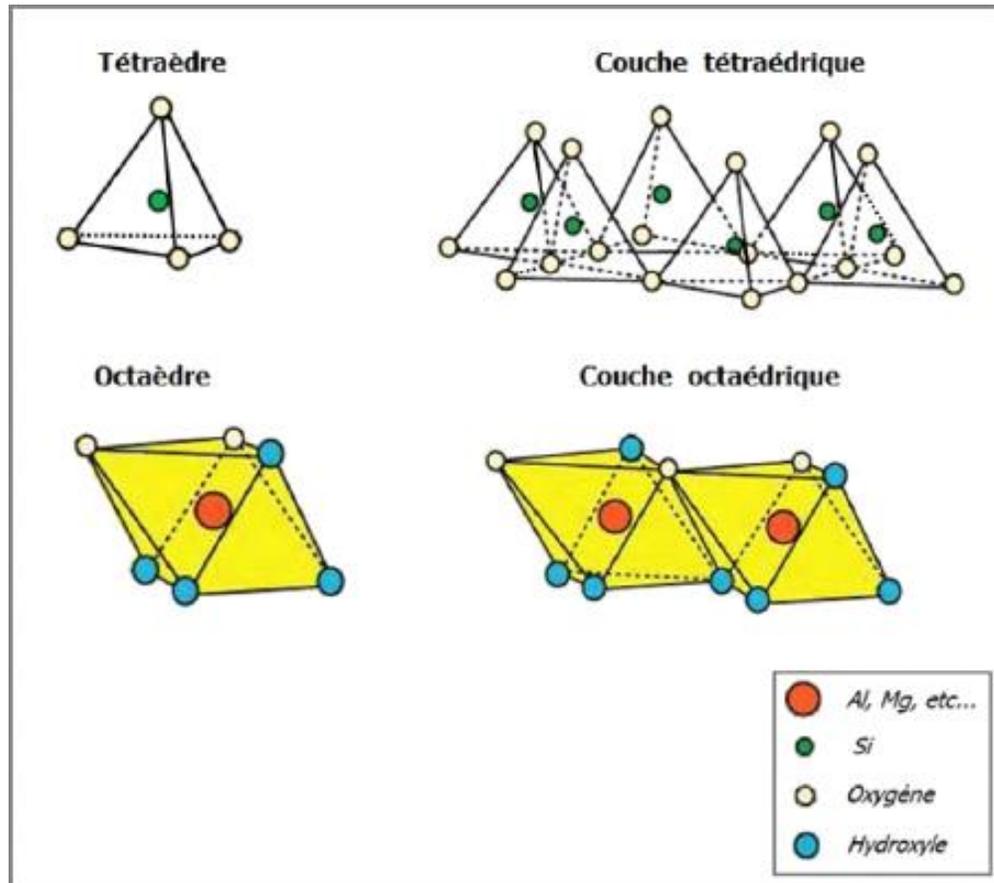
Quartz	62.57 %
Calcite	0.12 %
Illite	5.25 %
Microcline intermediate1	4.37 %
Chlorite IIb	0.57 %
Muscovite 2M1	8.19 %
Albite	7.51 %
Microcline maximum	2.53 %
Kaolinite (BISH)	5.33 %
Orthoclase	1.88 %
Montmorillonite	1.69 %

x = 19.40765 y = -732.6698 d = 5.306822



Composition du mortier et de la terre crue
(new) – illite + muscovite à considérer

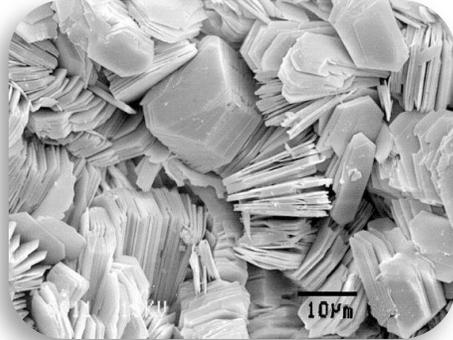
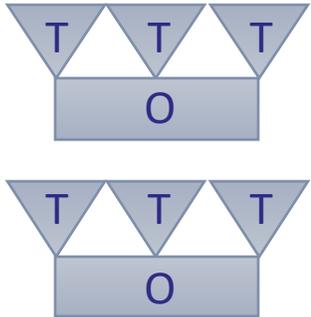
Structure des argiles



Argiles

Structure T-O

Kaolinite



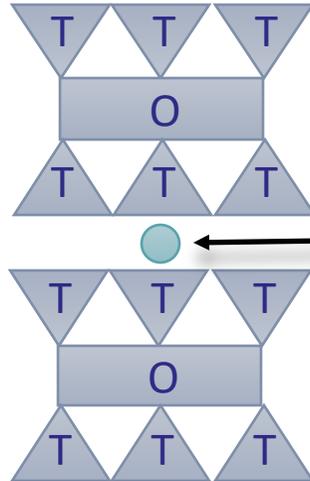
© CNRS Strasbourg

- Faible liaison entre les couches
- Charges sur les bords

Structure T-O-T

Illite

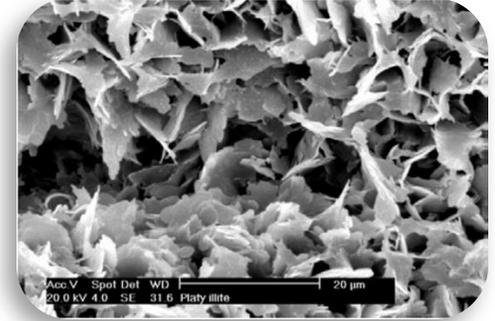
- Cations : K^+



Cation interfoliaire

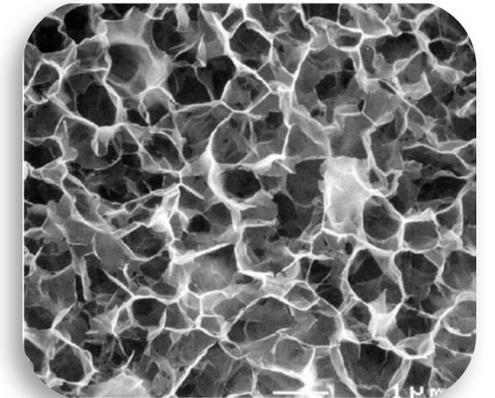
Montmorillonite

- Cations hydratés
- (Mg^{2+} , Ca^{2+} et Na^+)
- Argile gonflante



© M. Roe

Macaulay Institute Collection

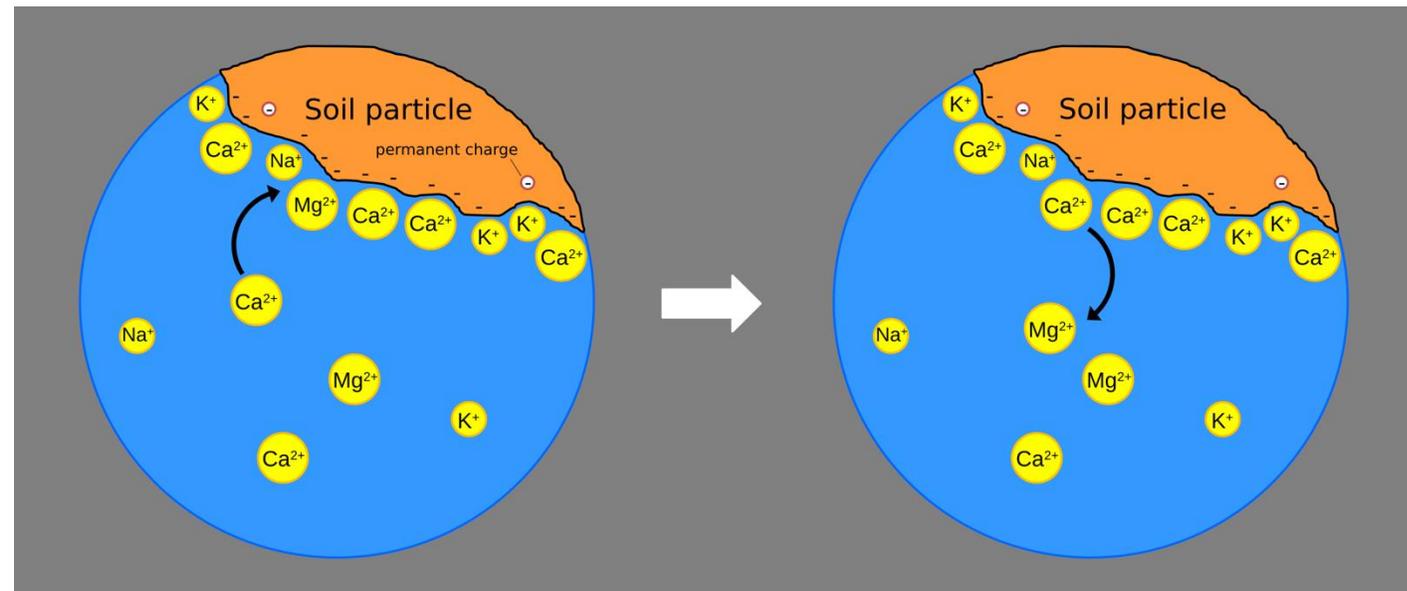


© Lana Loeber

Elisabeth Rosenberg

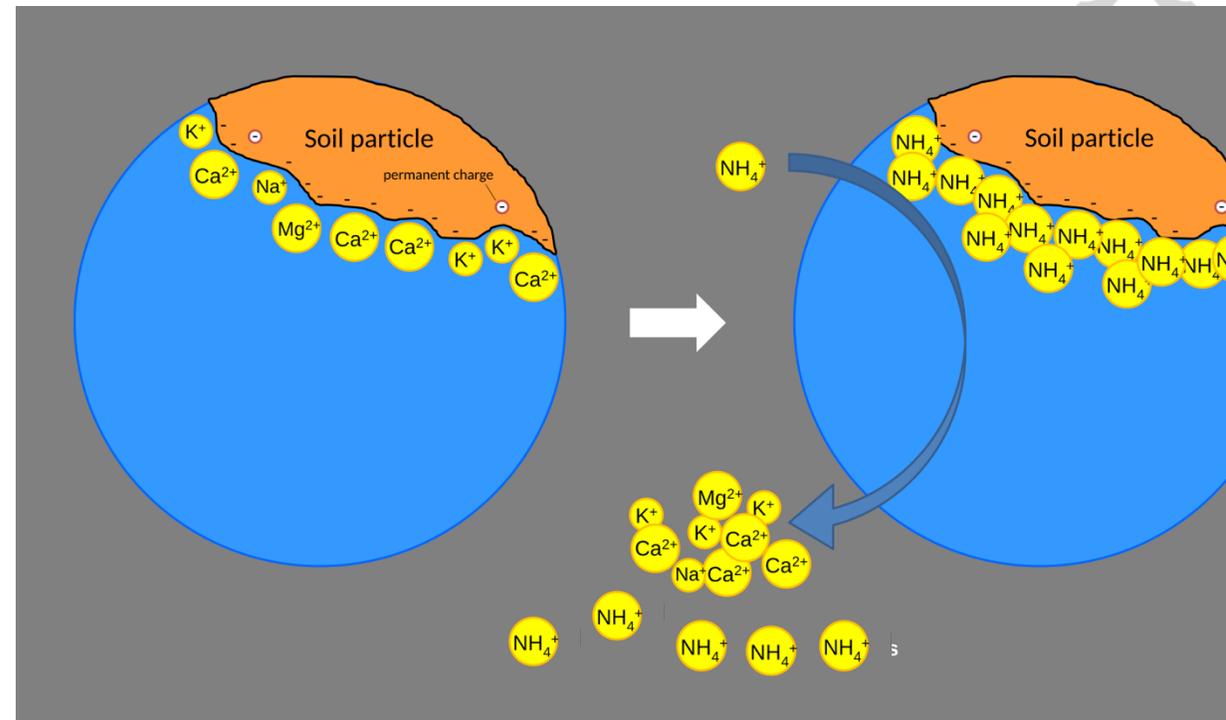
Capacité d'échange cationique

- Capacité d'un minéral argileux à adsorber les cations échangeable par d'autres cations présents en solution aqueuse.
- Elle est exprimée en meq/100g : milliéquivalent par 100 grammes , soit centimole de charges positives par kilogramme



Capacité d'échange cationique

- La capacité d'échange cationique (ou CEC) est mesurée par la méthode à la cobalthéxamine (Norme NF EN ISO 23470, 2018) en utilisant la spectrophotométrie UV-visible
- Autres méthodes de titration des ions : par ex. Methode ICP (Inductively Coupled Plasma)



Valeurs typiques de CEC

	Kaolinite	Illite	Montmorillonite
CEC (meq/100g)	3 - 15	10 - 40	80 - 150



Interactions avec l'eau



Les techniques de construction

Adobe



Maçonnerie de briques de terre crue

Blocs de Terre Comprimés (BTC)



Maçonneries de briques compactées

Torchis



Enduit

Mortier

Éclisse

Ossature

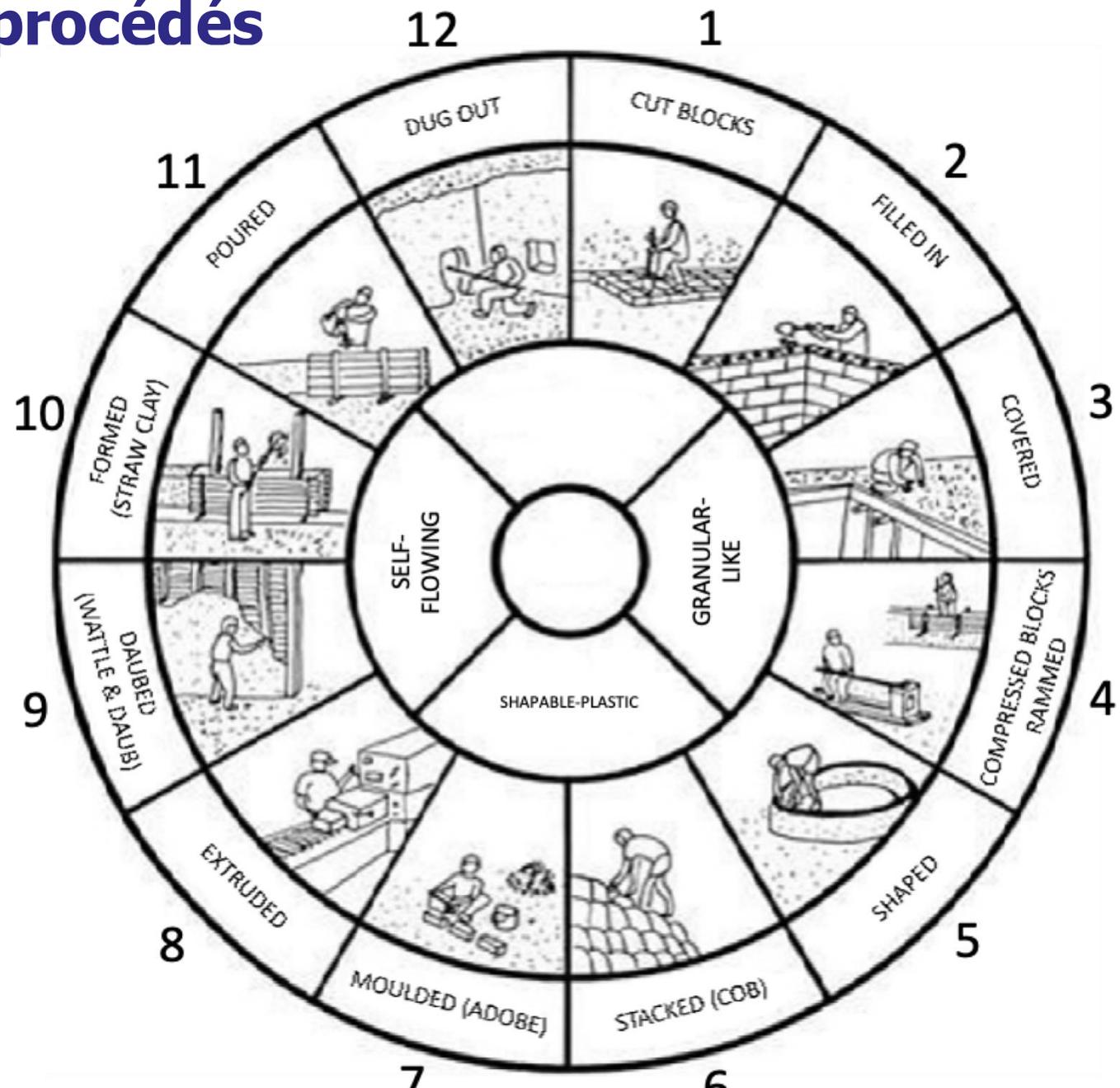


Enduits

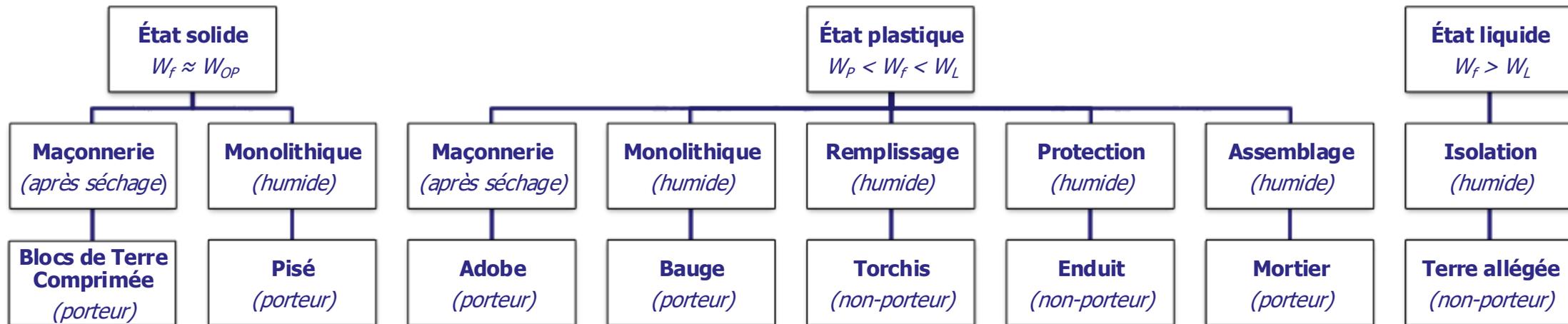


Chantiers Triphine Duvaufferrier

Classification des procédés



Classification des procédés

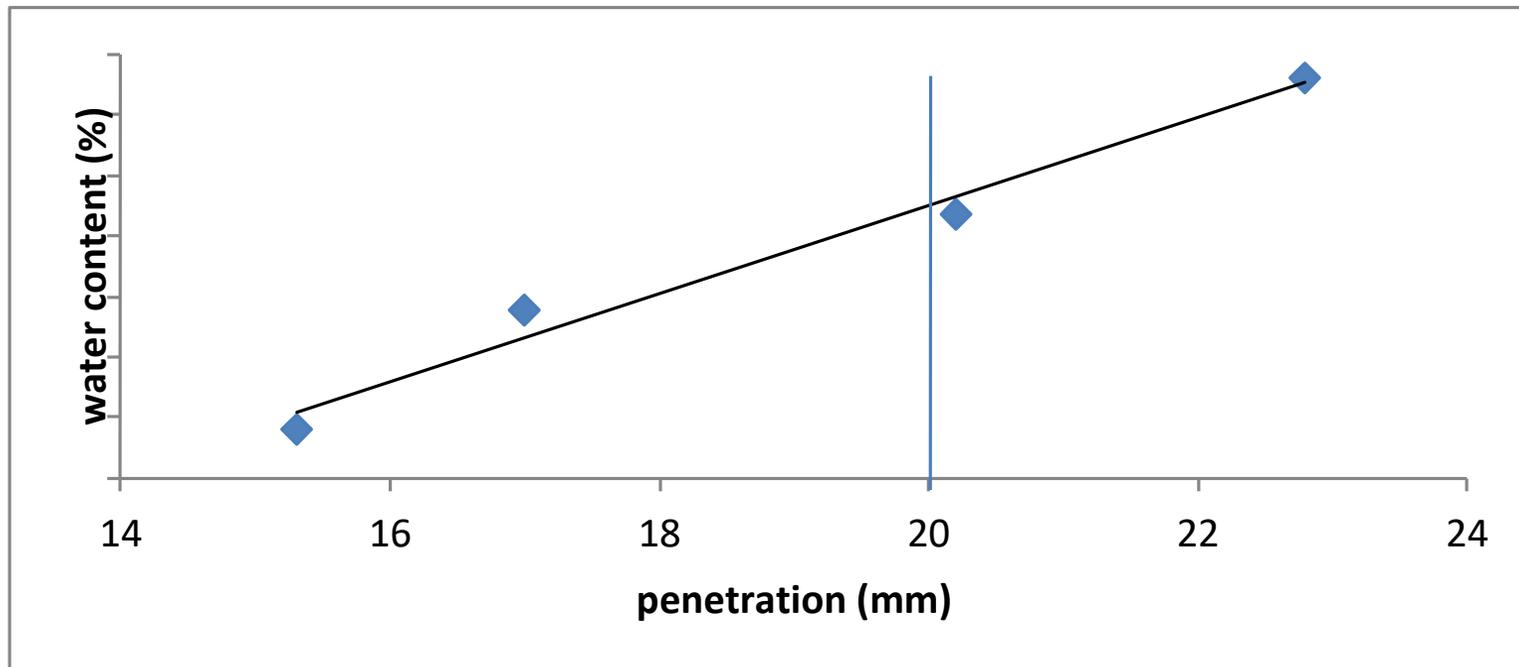


W_f = Teneur en eau de fabrication, W_{OP} = Teneur en eau optimale de compaction, W_p = Limite de plasticité, W_L = Limite de liquidité

Interactions avec l'eau

Limite de liquidité, cône de pénétration

- Tamisage de la fraction inférieure à 400 μm
- Mesure de la pénétration du cône
 - La limite de liquidité correspond pénétration de 20 mm



Limite de liquidité: Méthode Casagrande

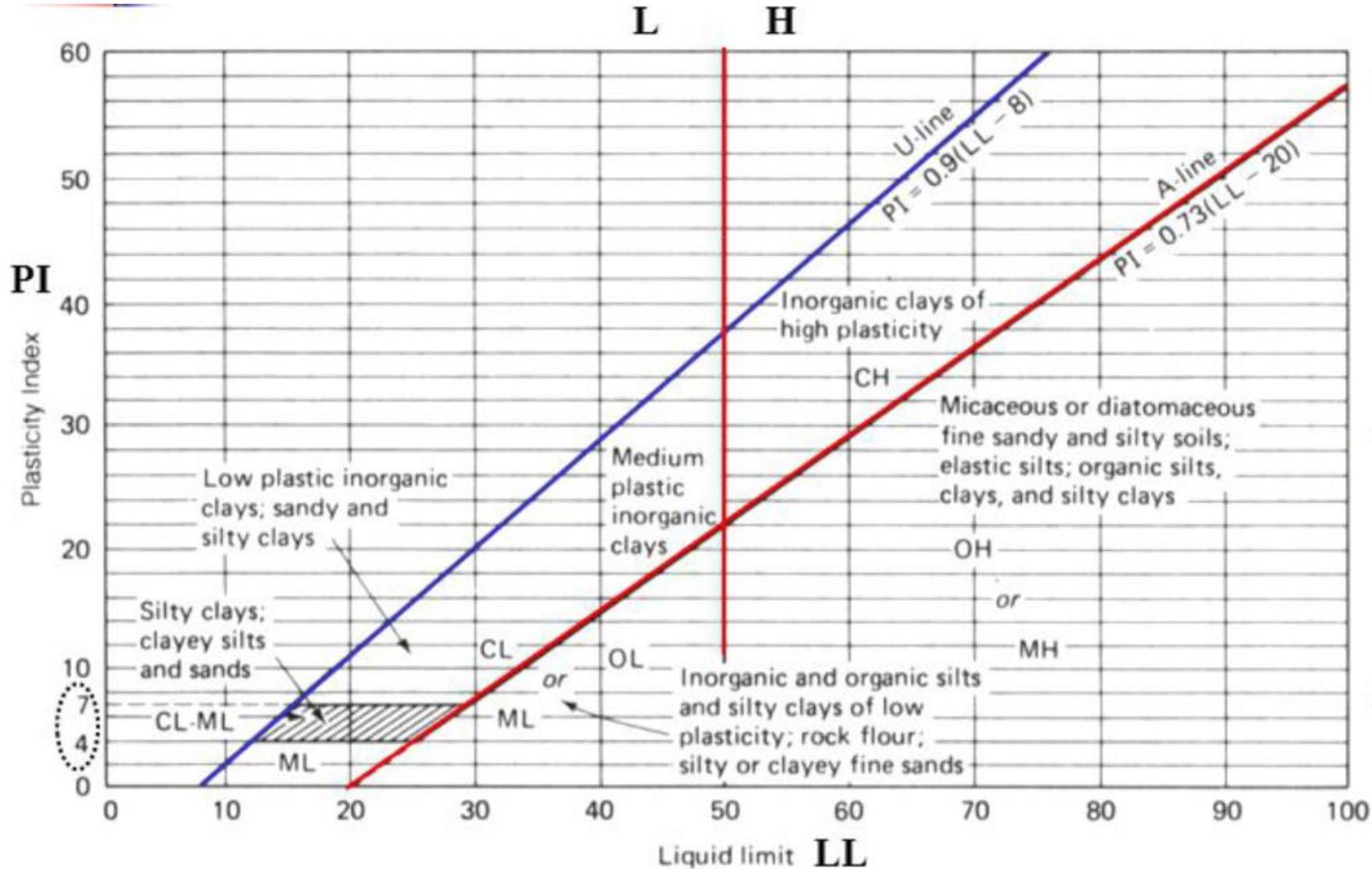
- Gobelet de casagrande avec sillon spécifique
- Nombre de tours pour que le sillon se referme



Limite de plasticité

- Rouler un fil jusqu'à ce qu'il atteigne une longueur de 10 cm et un diamètre de 3 mm
- Se coupe en le soulevant de 1 cm à partir du milieu.





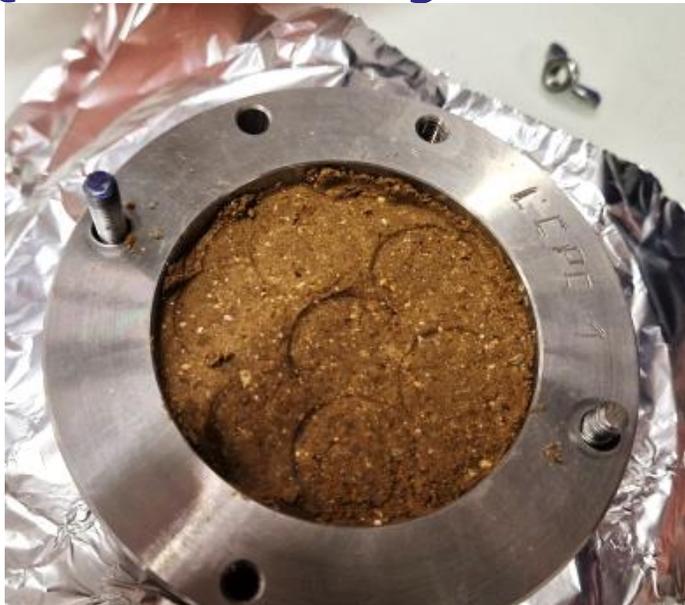
$$LL = PL + PI$$

Plastic Index



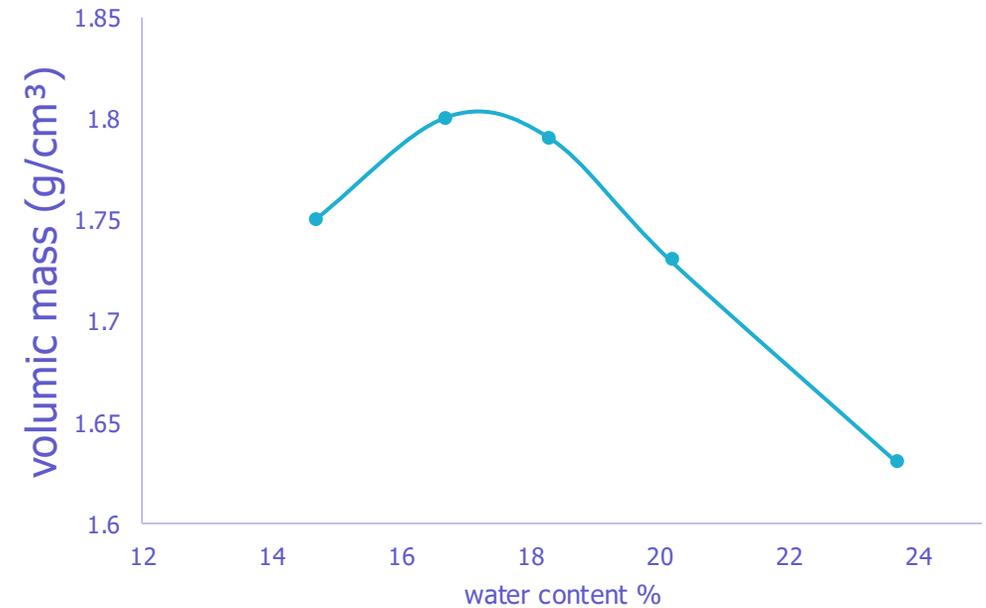
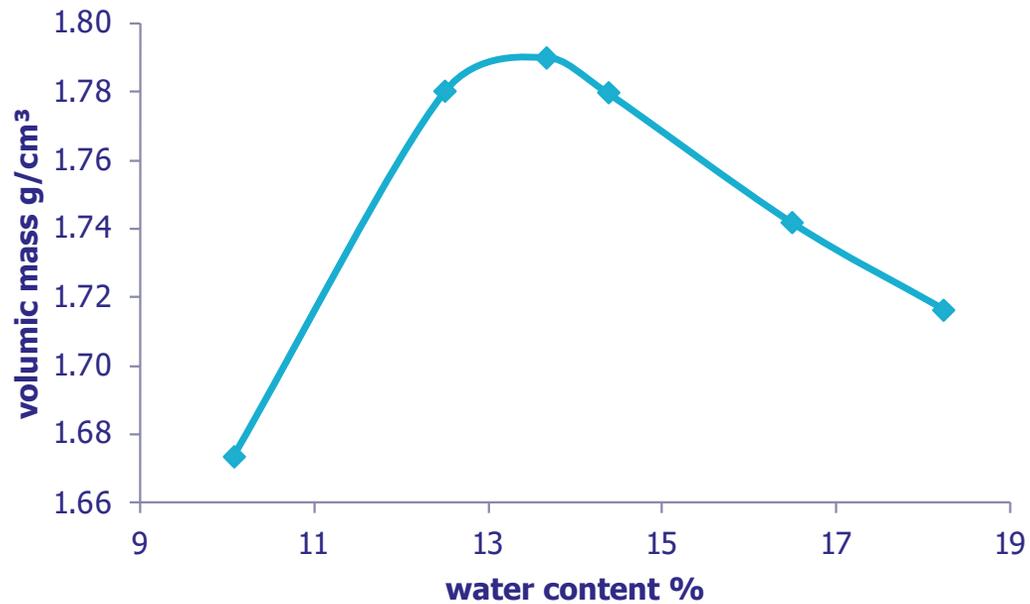
Essai Proctor

- Essai proctor modifié pour le laboratoire vs. Chantier géotechnique
- Moule de 19mm de hauteur, compacté en deux couches
- Nombre de coups par couche de 42.
- The height of the hit must be regulated to 50 ± 0.5 mm.
- Quantité d'énergie maîtrisée 0.595 KN.m/dm^3 .



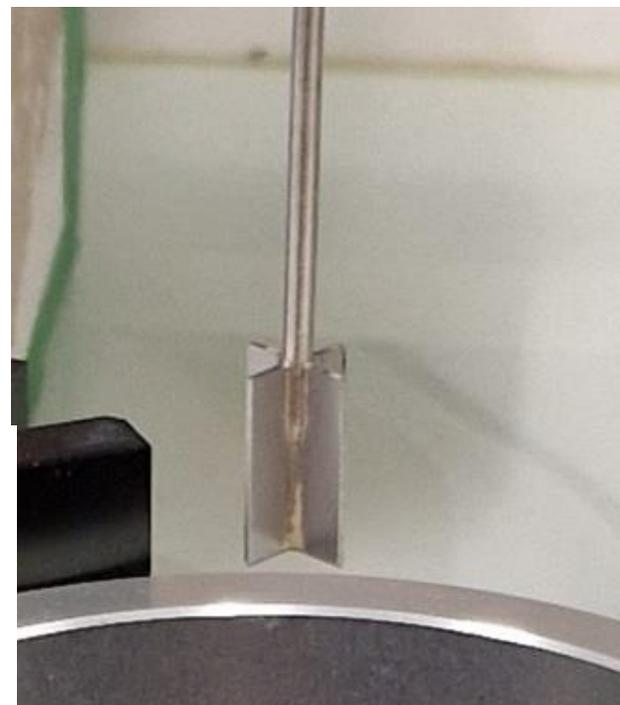
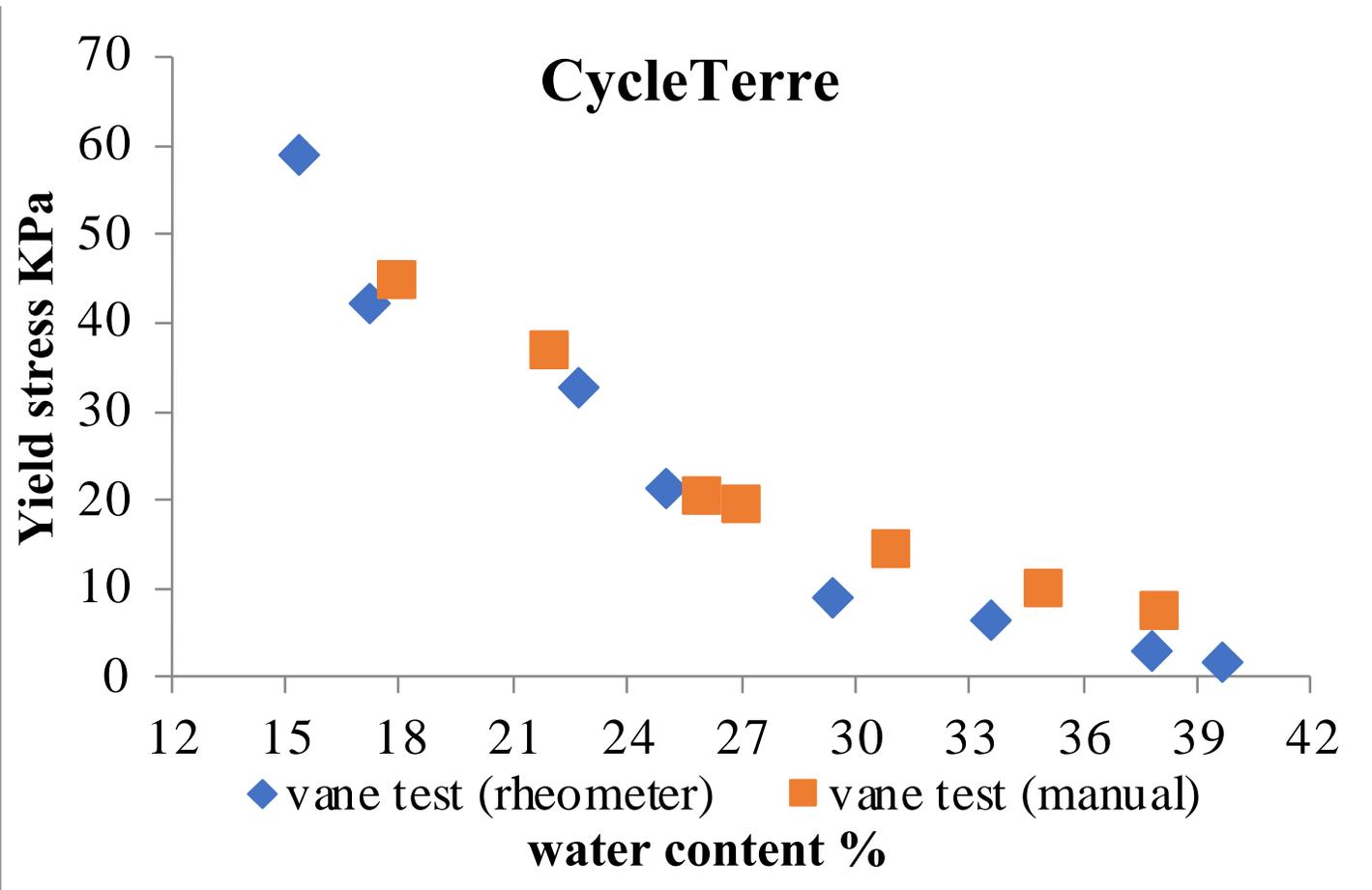
Essai Proctor

- Trouver l'optimum de compacité



Rhéologie

CycleTerre



Merci de votre attention

emmanuel.keita@univ-eiffel.fr



Essais chantier

Essais croisés

7 terres
6 essais chantiers
7 teneurs en eau

- Identifier le lien entre caractérisation et usage
- Propriété rhéologique identifiable
- Répétabilité du test
- Transportabilité, facilité d'exécution

