

Journée scientifique de l'OREME 2024

Voyage en Géosciences : de la planète habitable aux ressources minérales critiques

OREME

OBSERVATOIRE DE RECHERCHE
MONTPELLIÉRAIN DE L'ENVIRONNEMENT

#OREME2024



Journée scientifique de l'OREME 2024

Exploration de l'habitabilité des planètes : de la Terre aux exoplanètes



Pascal PHILIPPOT

Directeur de Recherche, CNRS
Géosciences Montpellier

 @Pascal Philippot



Ana PALACIOS

Astronome, Laboratoire Univers
et Particules de Montpellier



#OREME2024



Journée scientifique de l'OREME 2024

Pourquoi et comment la Terre est-elle devenue habitable ?



Pascal PHILIPPOT

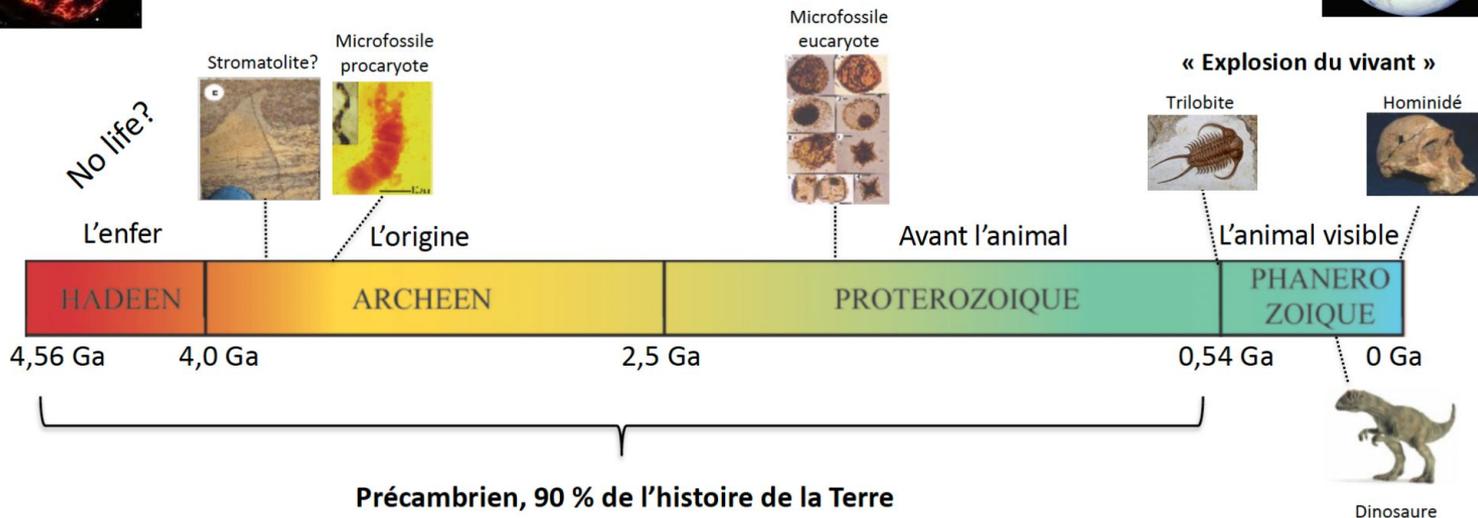
Directeur de Recherche, CNRS
Géosciences Montpellier

 @Pascal Philippot



#OREME2024

Les grandes étapes de l'histoire de la Terre définies à partir des traces de vie fossile



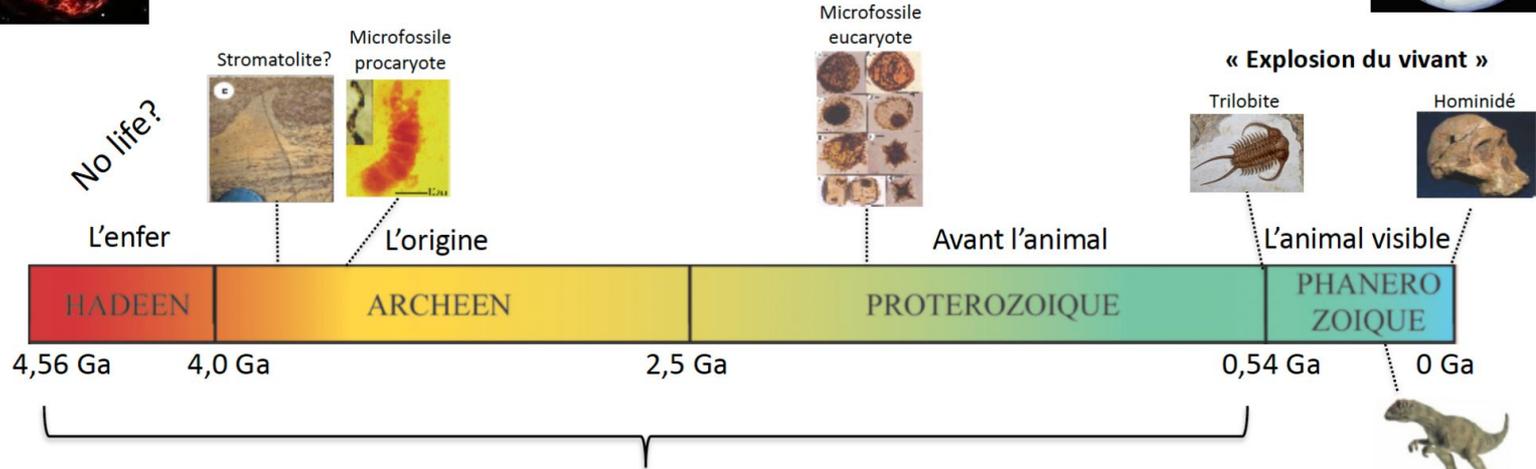
Précambrien, 90 % de l'histoire de la Terre
Atmosphère riche en CO₂ (± CH₄)
Océans anoxiques, riches en fer ou en soufre
Monde unicellulaire essentiellement procaryote

Ga = 1 milliard d'années

Les grandes étapes de l'histoire de la Terre définies à partir des traces de vie fossile



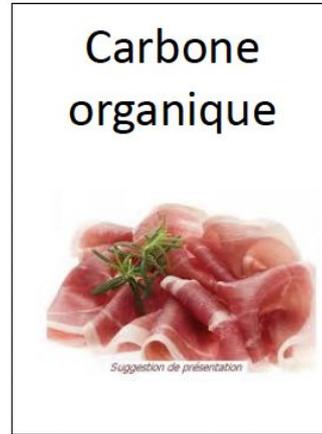
- Quels moteurs pour engendrer et maintenir la vie sur près de 4 Ga?
- Rôle de la vie dans l'évolution de la composition et l'état redox des enveloppes externes (océans, atmosphère)?



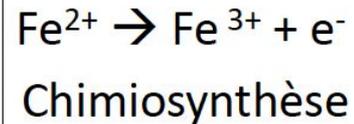
Précambrien, 90 % de l'histoire de la Terre
Atmosphère riche en CO₂ (± CH₄)
Océans anoxiques, riches en fer ou en soufre
Monde unicellulaire essentiellement procaryote

Ga = 1 milliard d'années

✔ Les ingrédients de la vie



Energie

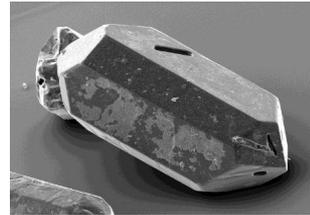
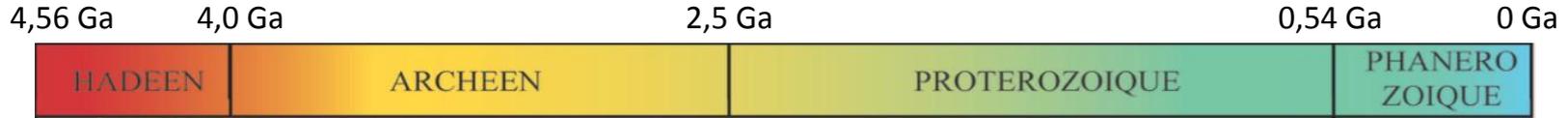


$$E = h\nu$$

Photosynthèse

+ répllication et stockage de l'information

Les zircons de Jack Hills (Australie) datés à 4.4 Ga suggèrent la présence d'eau liquide 150 Ma après la formation de la Terre

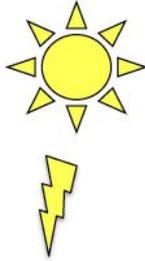


✔ Energie solaire et chaleur interne illimitées

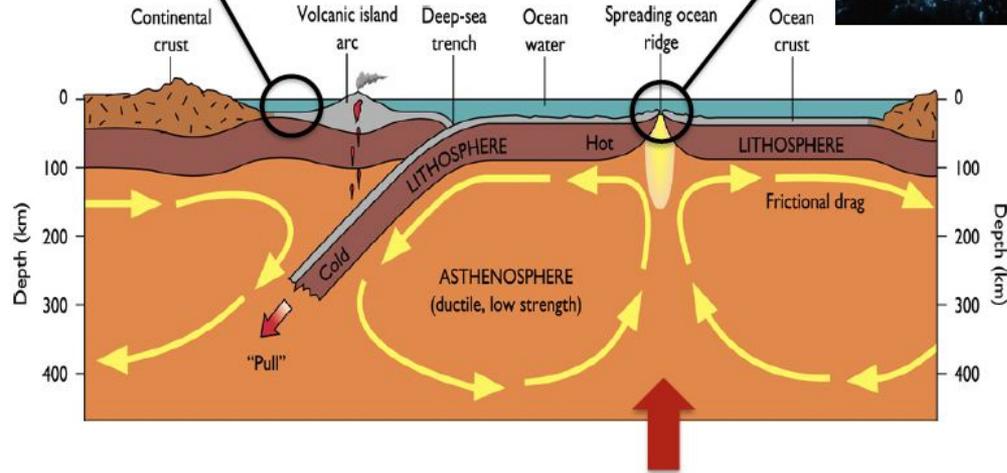
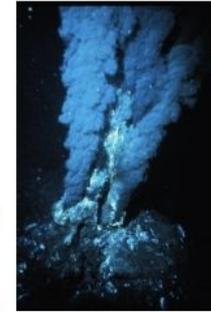
$E = h\nu$
Photosynthèse



Energie solaire



redox $\Delta G_{rx} = -nF \Delta E^{\circ}$
Chimiotrophie

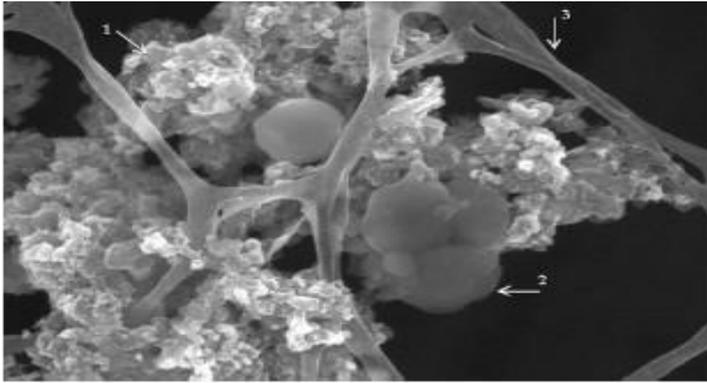


Chaleur interne (production radiogénique)



#OREME2024

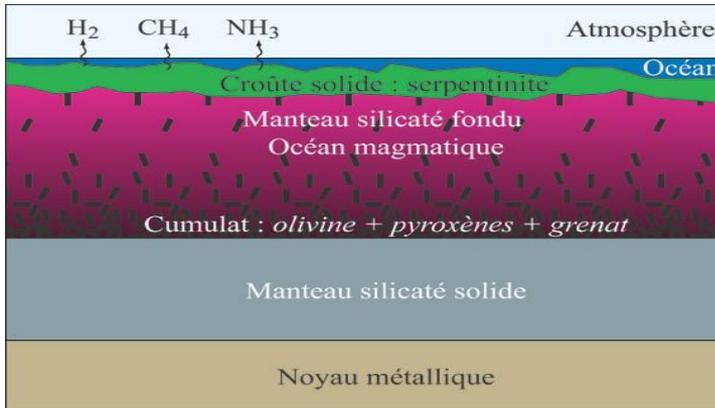
✔ CO₂ atmosphérique et molécules organiques terrestres et extra-terrestres en abondance



Macromolécules organiques de la météorite de Murchison

Météorites ~ 10 tonnes/an

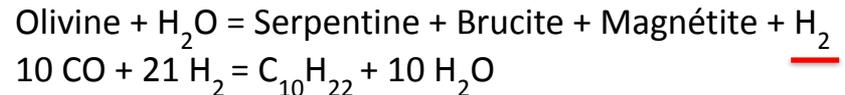
- 75 acides aminés
- 3% en poids de carbone (chondrites carbonées)



« Hydrated raft »

- Croûte peu différenciée à l'Hadéen
- Eau en abondance
- Transfert de chaleur élevé

Synthèse de Fischer-Tropsch



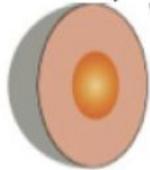
Plus vieux zircons
Présence d'eau liquide?



Vernis tardif



Formation de la Terre
4.56 Ga



Differentiation
du noyau



Formation de la Lune par
impact géant

Tous les ingrédients du vivant
(eau, carbone organique et
inorganique, énergie) sont
disponibles très tôt dans l'histoire de
la Terre.

Combien de temps avant le premier
être vivant?



Chimie prébiotique dès 4,4 Ga?



#OREME2024

Toutes les espèces vivantes sont liées les unes aux autres

Nous avons la même origine

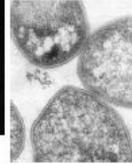
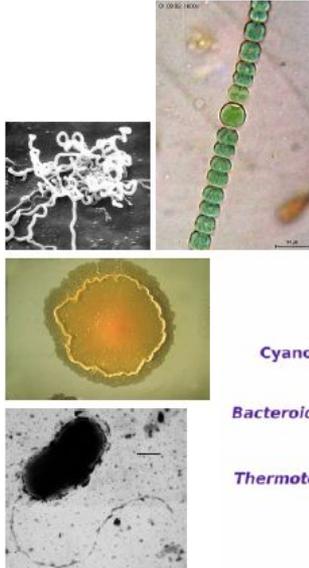
Nombre total d'espèces estimé entre 3.10^6 et 10^{12} dont 99% éteintes

2 millions d'espèces vivantes répertoriées

20000 nouvelles découvertes chaque année



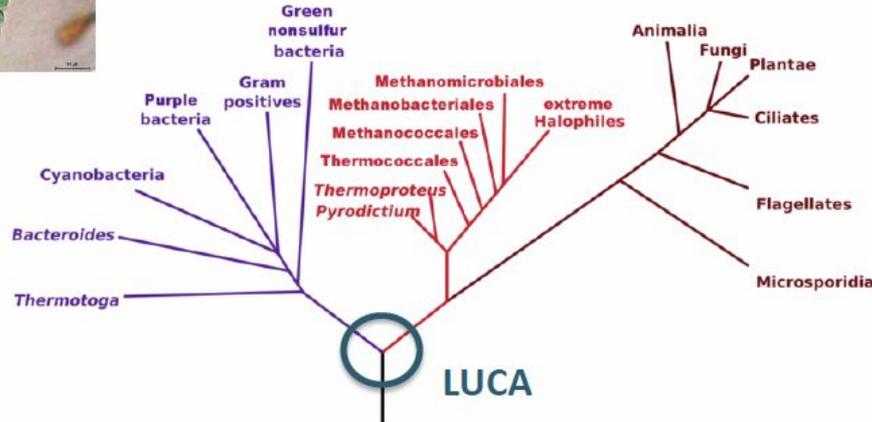
Carl Woese



Bacteria

Archaea

Eucarya

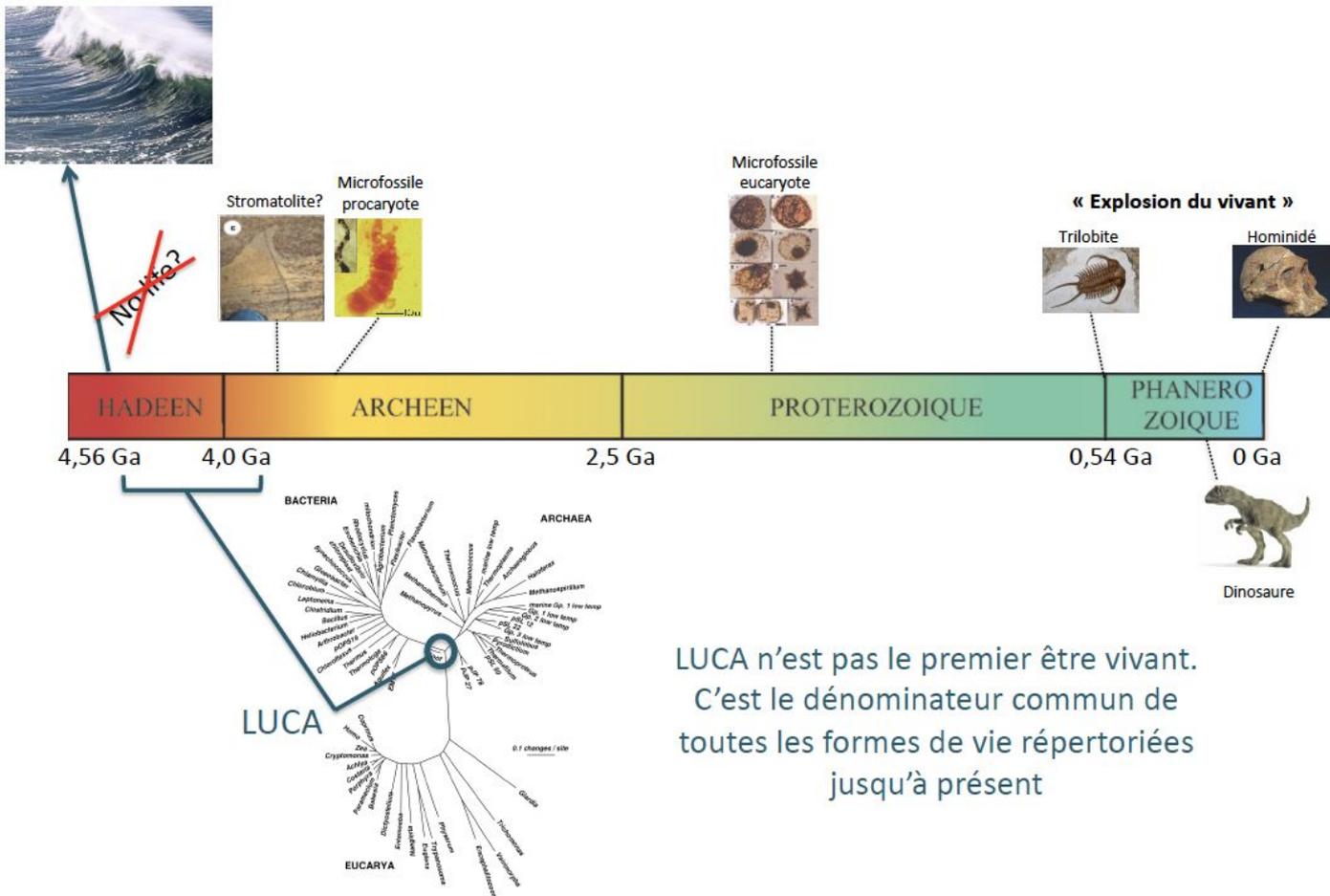


LUCA = Last Universal Common Ancestor



#OREME2024

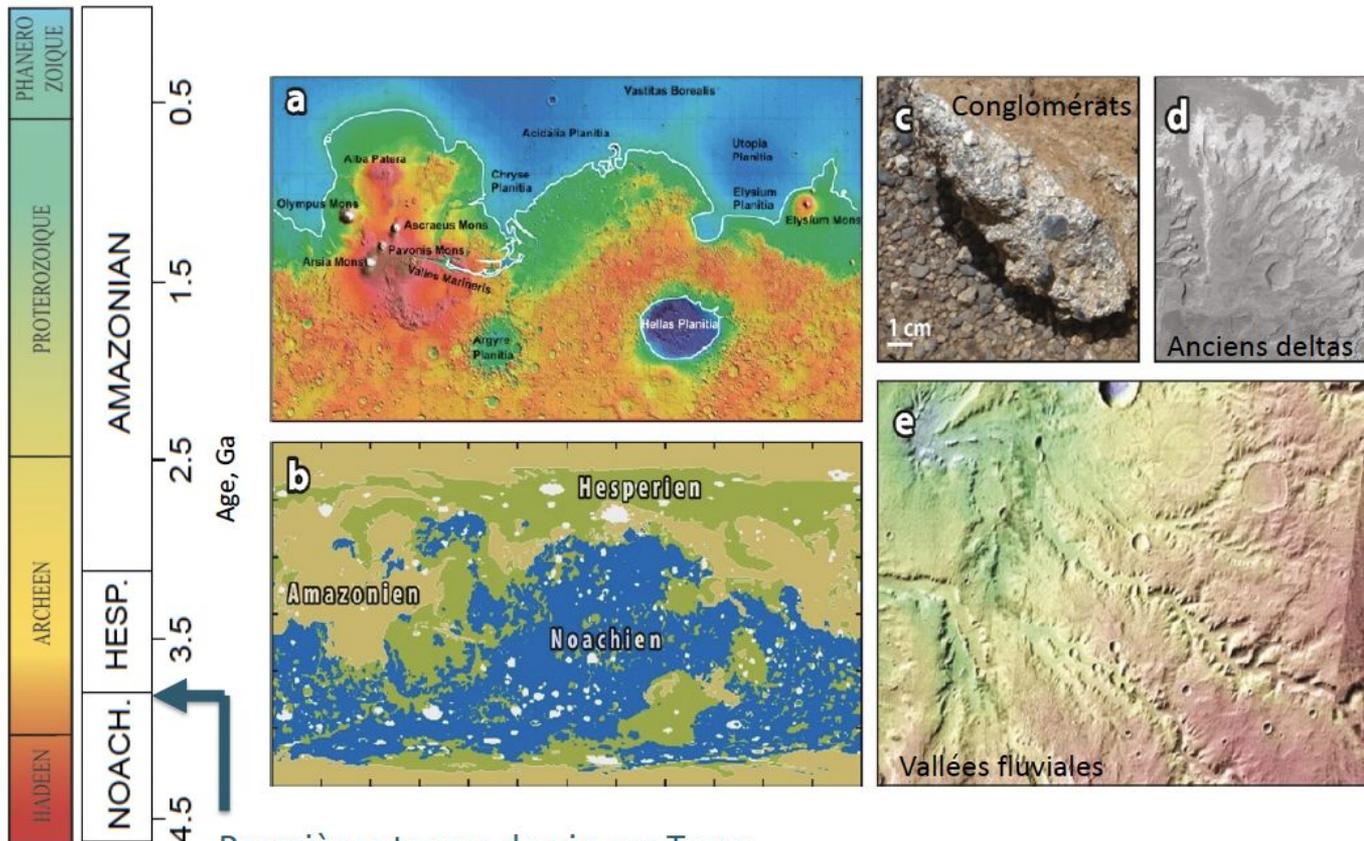
✔ LUCA probablement très précoce, dès l'Hadéen ?



LUCA n'est pas le premier être vivant.
C'est le dénominateur commun de
toutes les formes de vie répertoriées
jusqu'à présent



On trouve des traces d'eau liquide très tôt dans l'histoire de Mars. Pourquoi la vie s'est-elle développée sur Terre et pas sur Mars ?

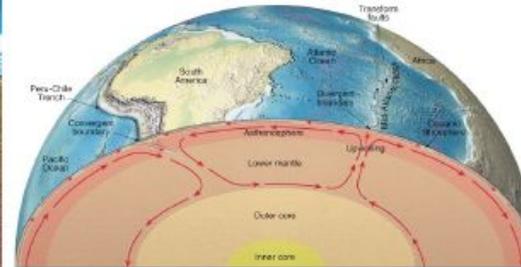


Premières traces de vie sur Terre

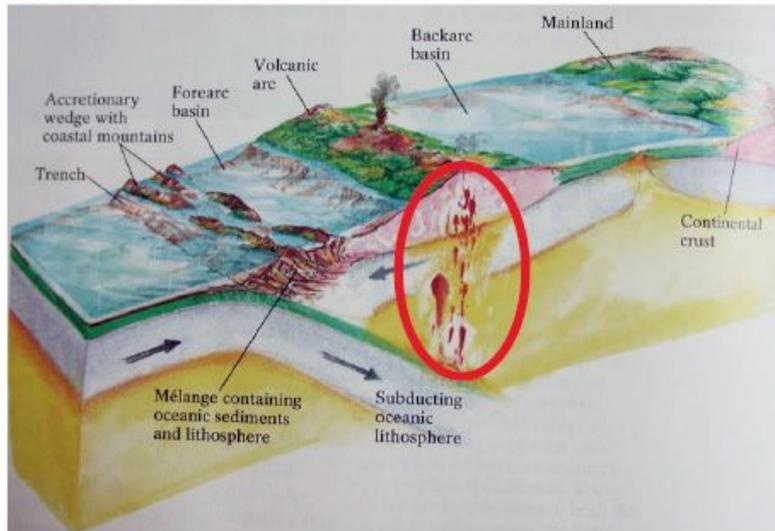


#OREME2024

✔ H₂O - régulateur de la tectonique des plaques et de la création des continents (subduction)

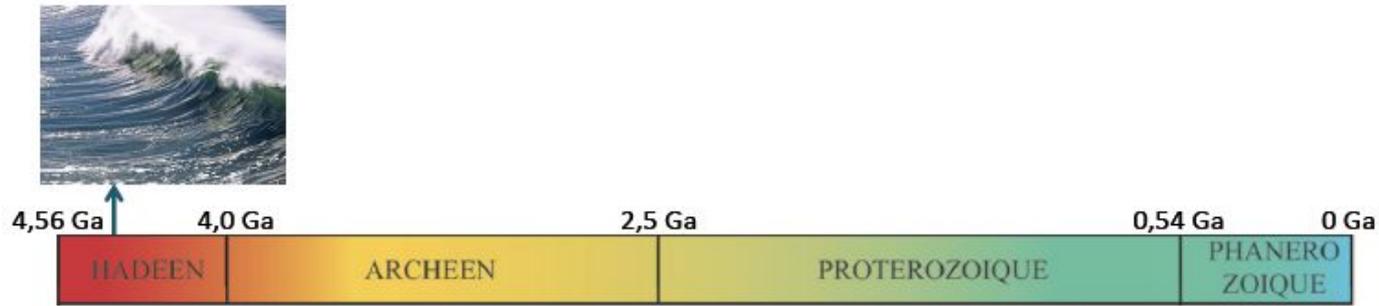


Convection mantellique

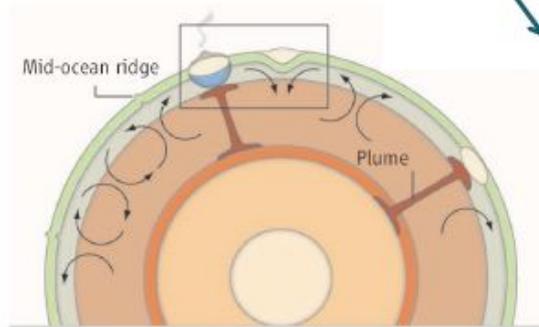


Couplage entre intérieur de la Terre et enveloppes externes (océans, atmosphère)

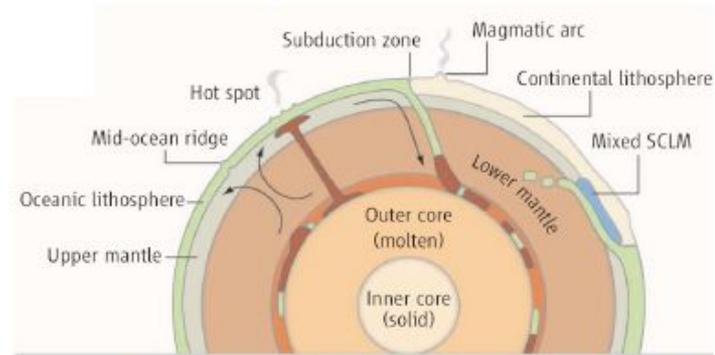
✔ Origine de la subduction controversé ~ 3.5 et 3.0 Ga



Avant ~ 3.5-3.0 Ga



Après ~ 3.5-3.0 Ga



Couplage entre intérieur de la Terre et enveloppes externes (océans, atmosphère)



La croûte continentale émergée régulateur climatique (CO₂, Temp. de surface) et biologique (enrichie en P, N, Si, Fe, Cu, Mo, Ni...)

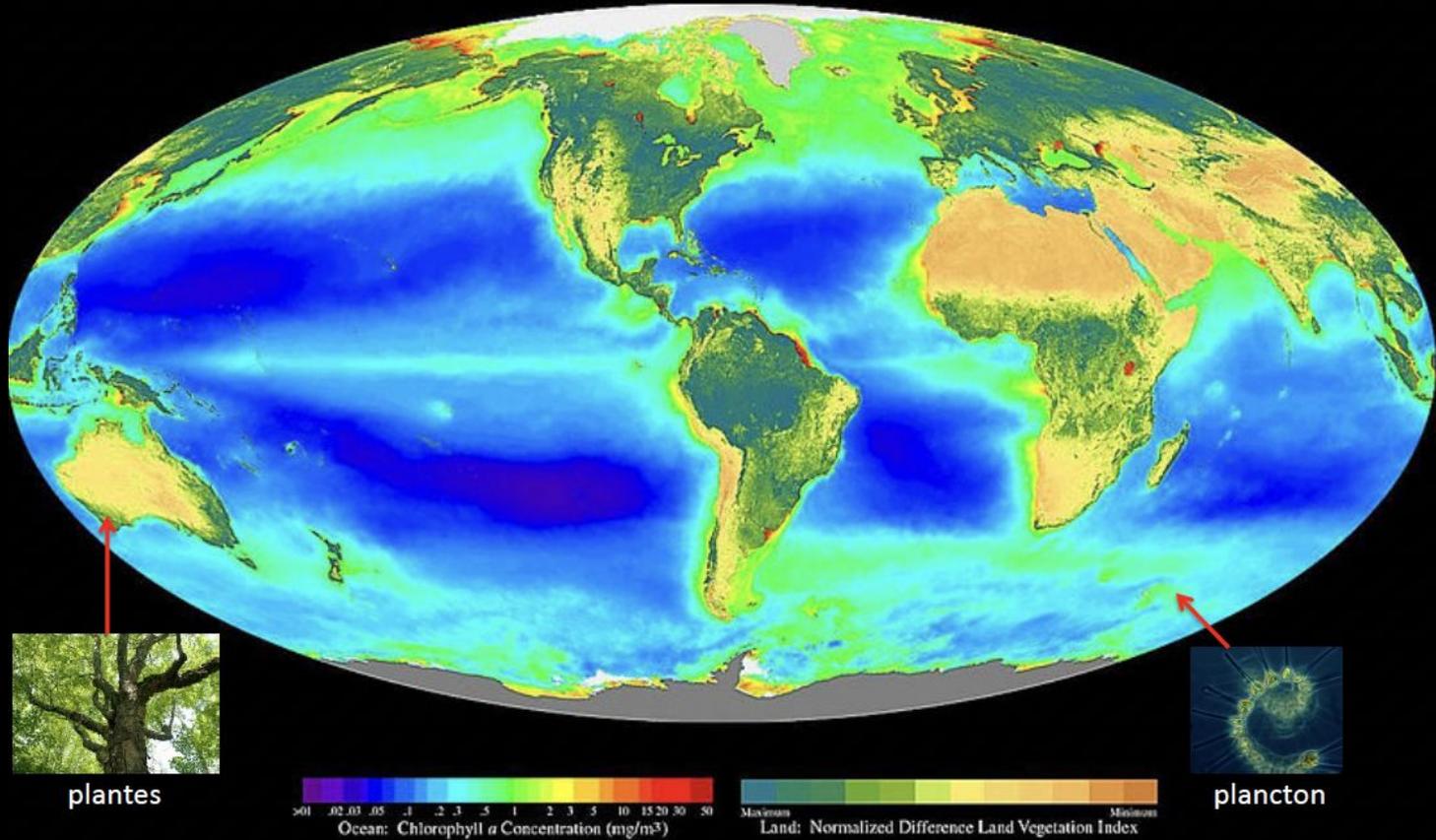


Cycle de l'eau externe – évaporation transpiration

Erosion et drainage des nutriments dans l'océan

(10 fois plus de phosphore (ADN) dans la croûte continentale que dans la Terre silicate)

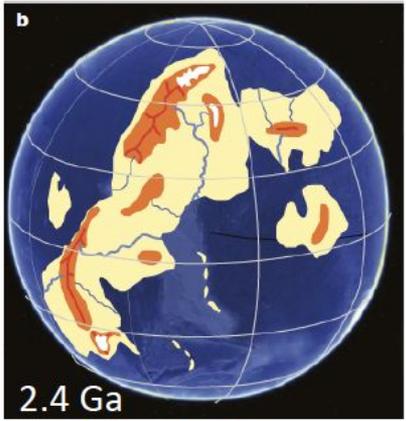
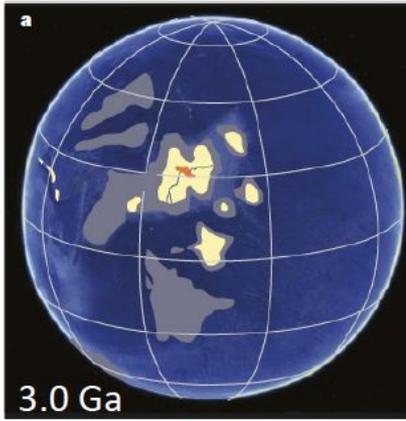
Relation vie et surfaces continentales



Distribution de la production primaire sur les continents et les océans qui produit l'oxygène sur Terre.
La limitation de la production primaire est contrôlée par l'apport en nutriments (P, N...)

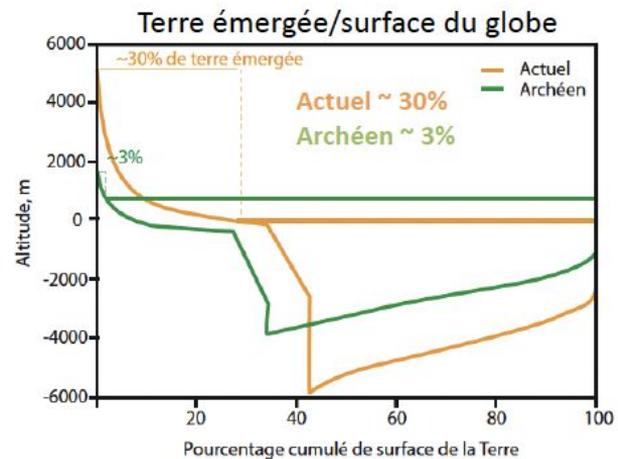
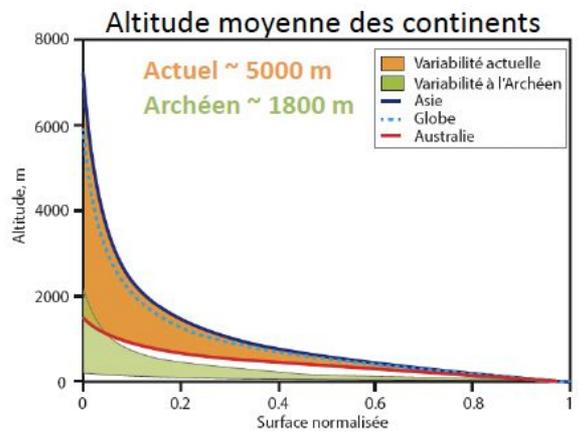
✓ Hypsométrie, bathymétrie et niveau de la mer

Terre archéenne
sous marine
(pas de montagne)

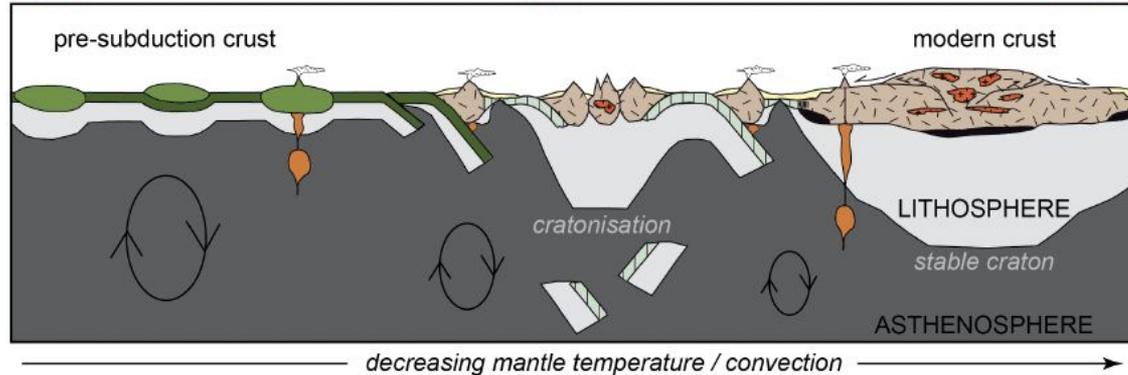
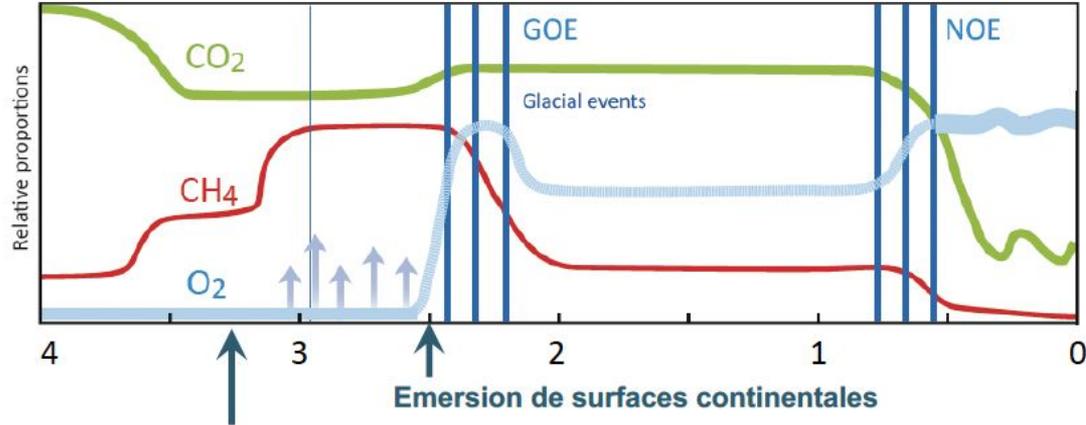


Emergence
marquée des
continents
vers 2.5 Ga

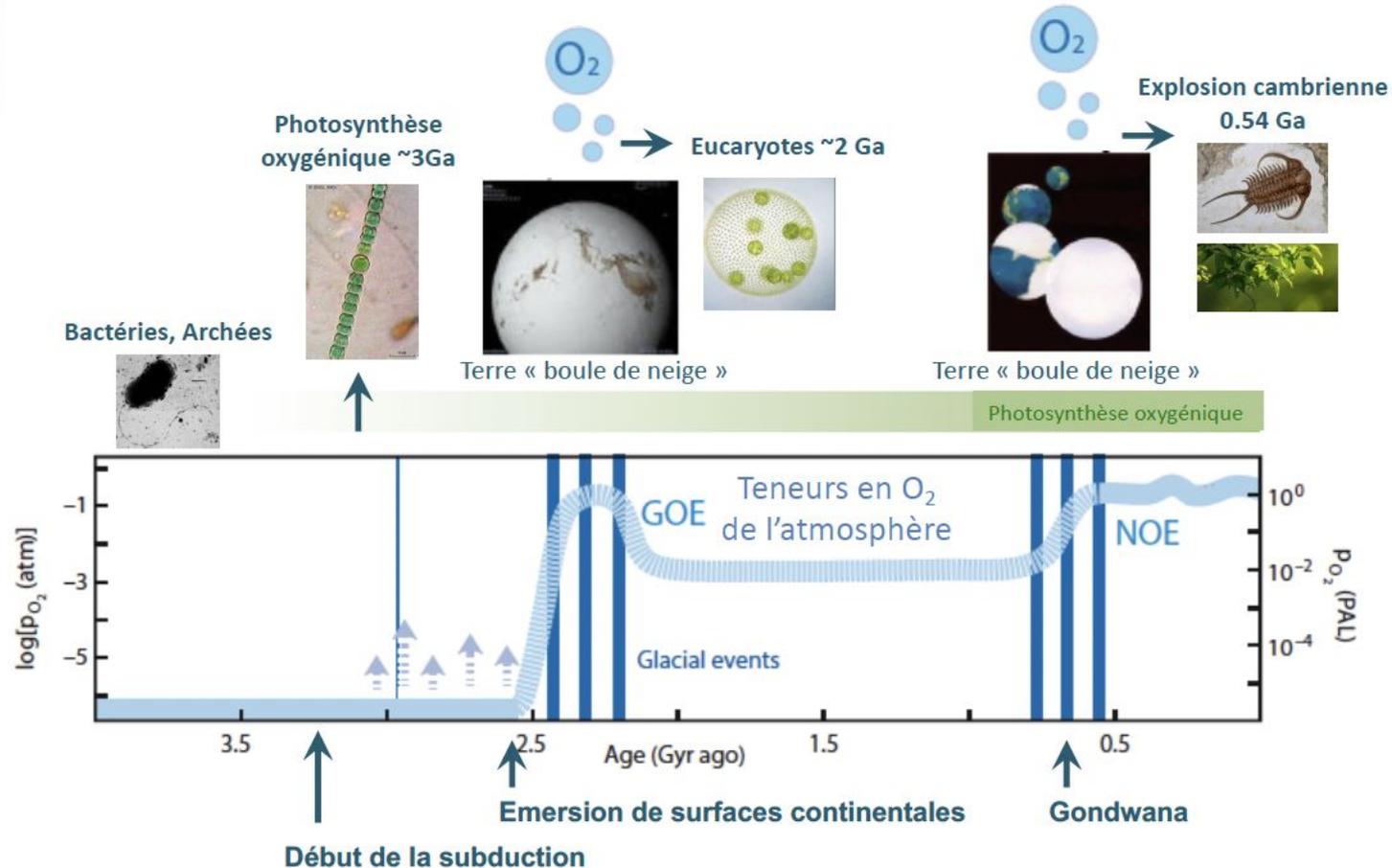
Volume de croûte continentale ~ constant



GOE = Great Oxidation Event
NOE = Neoproterozoic Oxygenation Event



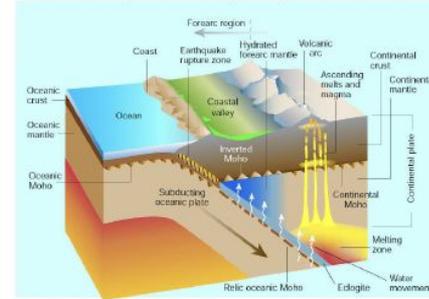
✓ Lien entre dynamique interne et évolution des enveloppes externes (océans, atmosphère et biosphère)



Reste la poule et l'œuf...



Tectonique des plaques



Est-ce la géodynamique terrestre et la formation des continents (subduction) qui, en concentrant des éléments bio-essentiels (NO_3 , PO_4 , SiO_2 , Fe, Cu, Mo, Ni, Co, W), favorisent le développement de la vie?

Ou est-ce la vie, en modifiant les cycles bio-géochimiques (C, N, S, O) et les processus d'érosion et d'altération, qui contrôle la géodynamique terrestre?

P, N, Fe...



Granitoïde





Journée scientifique de l'OREME 2024

Exoplanètes, habitabilité et Planète B



Ana PALACIOS

Astronome, Laboratoire Univers
et Particules de Montpellier



#OREME2024

✔ Qu'est-ce qu'une exoplanète ?

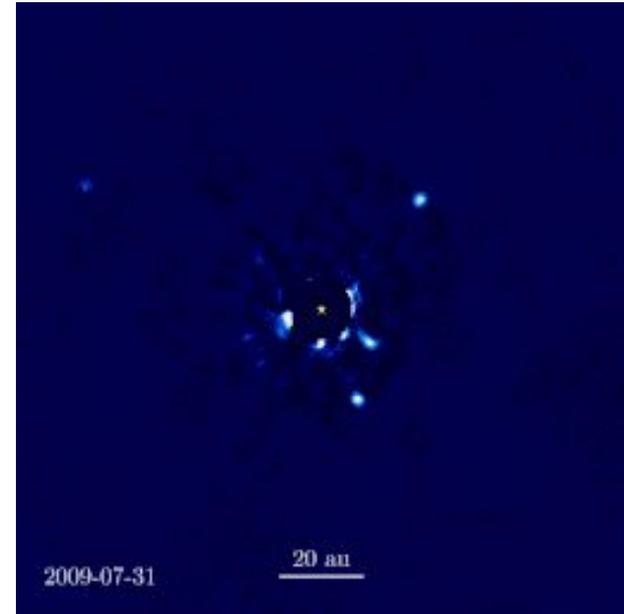
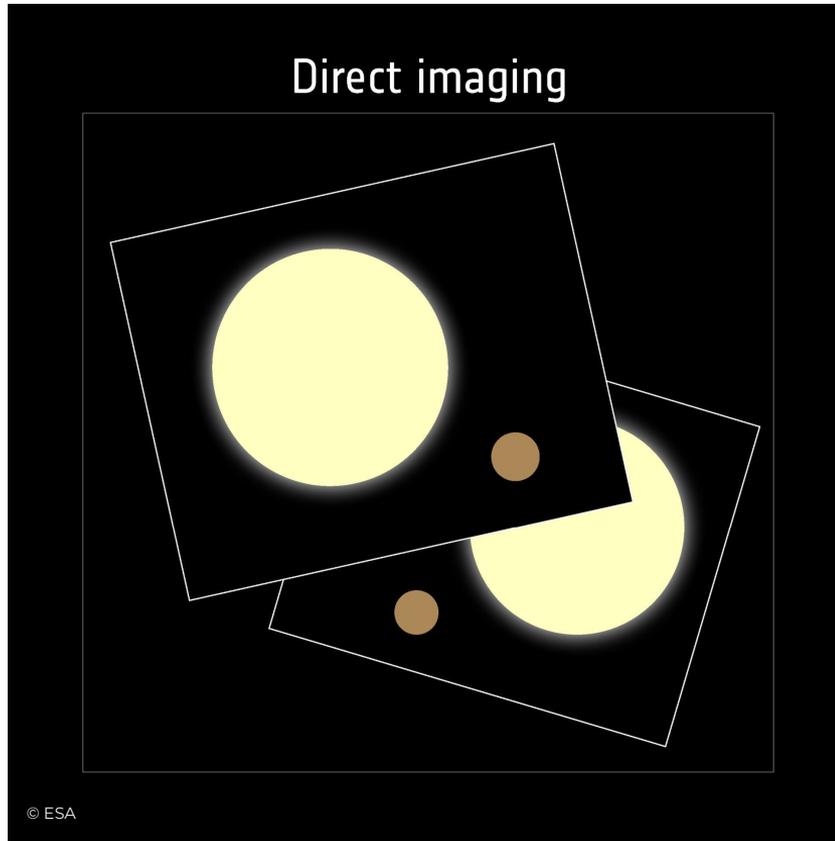


D'après la définition proposée en 2022 à l'UAI, il s'agit d'un corps qui

- ne produit pas d'énergie nucléaire interne ($M < 13 M_{\text{Jup}}$)
- orbite autour de corps stellaires autres que le Soleil
- a une masse inférieure à $1/25^{\text{ème}}$ de la masse de l'objet central



✔ Méthodes de détection

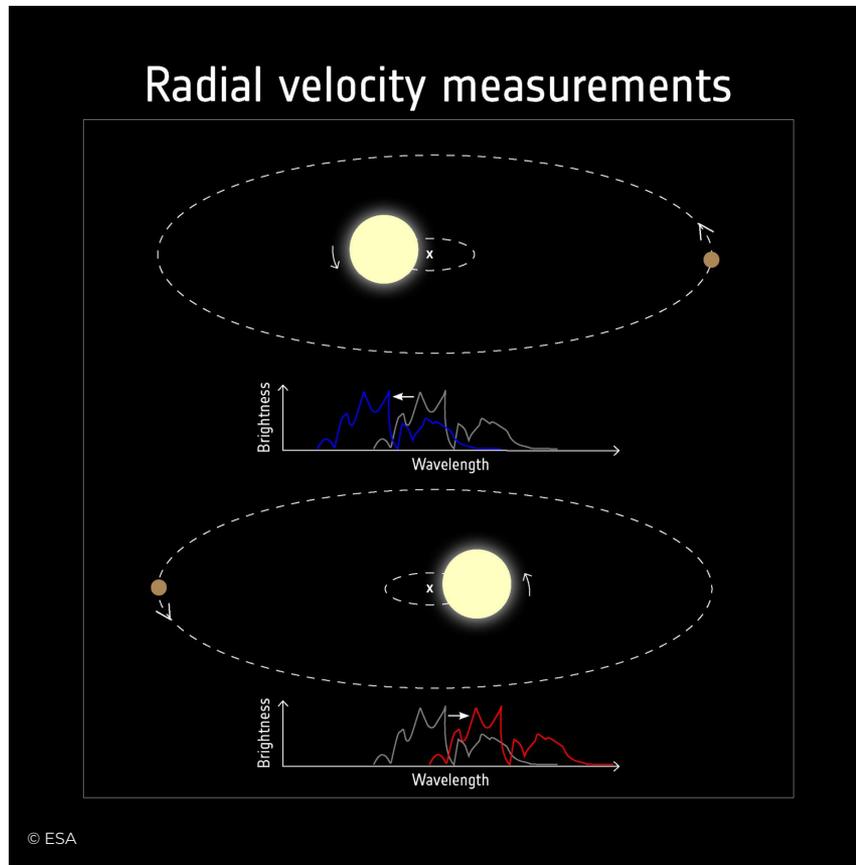
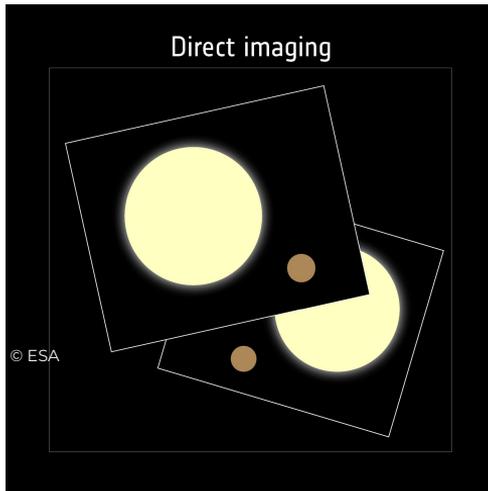


HR 8799b,c,d,e vues par GRAVITY@ESO



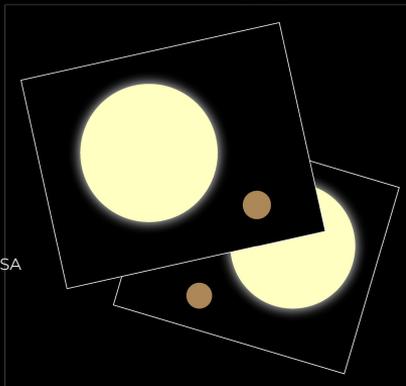
#OREME2024

✔ Méthodes de détection



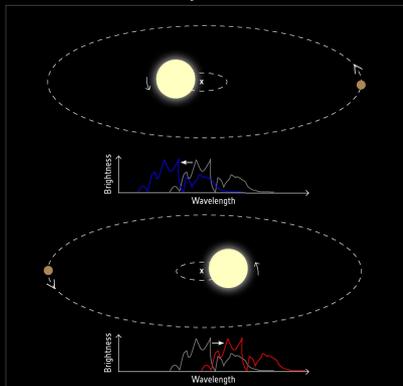
✔ Méthodes de détection

Direct imaging



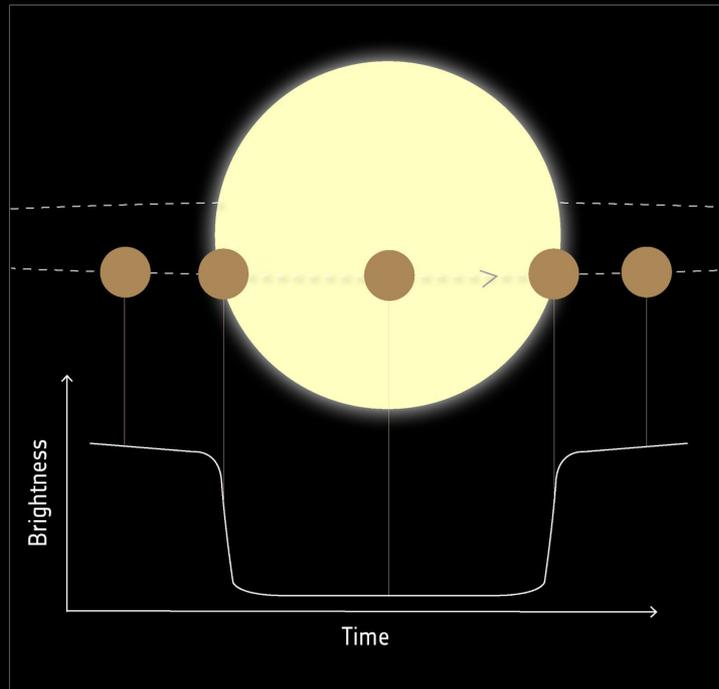
© ESA

Radial velocity measurements



© ESA

Transit photometry



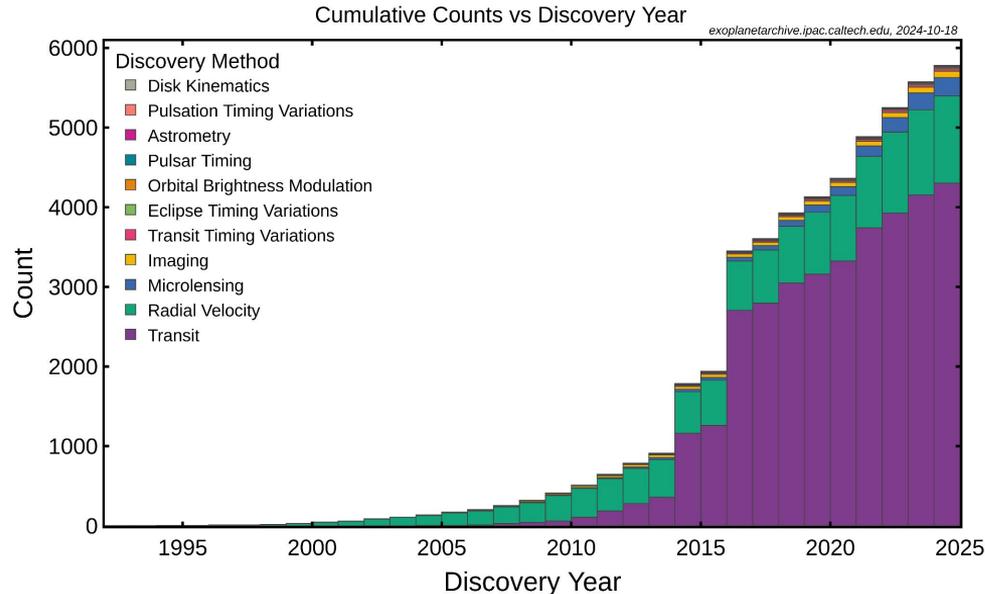
© ESA

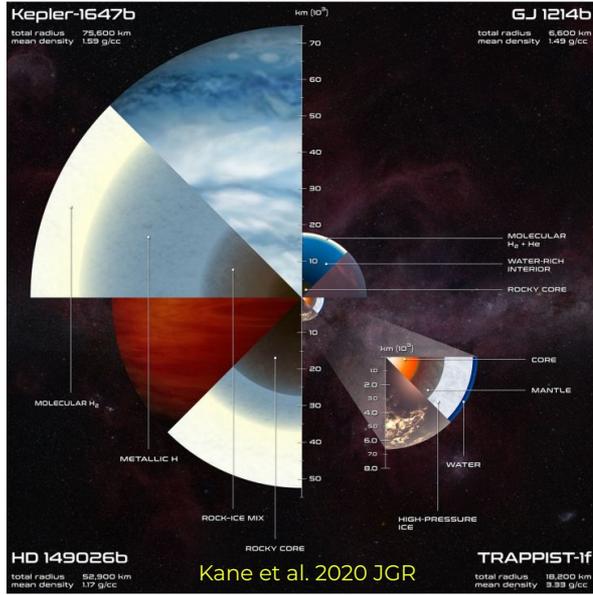


#OREME2024

✔ Découvertes et zoologie

- **1992** premières exoplanètes autour d'un pulsar
- **1995** première exoplanète autour d'une étoile "normale"
- **2001** première exoplanète dans la zone habitable d'une étoile de type solaire
- **11/2024** : ... 5780 exoplanètes confirmées





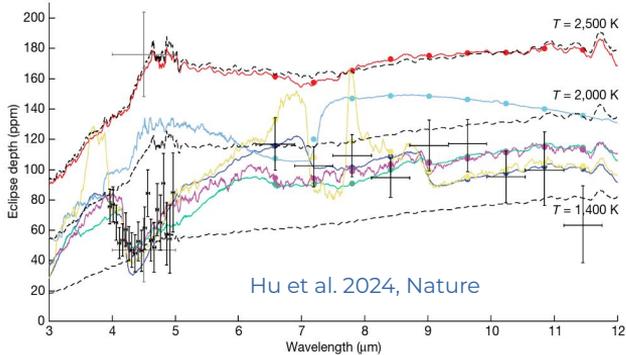
De la détection à la caractérisation

Les caractéristiques des exoplanètes sont déduites de celles de leurs étoiles hôtes..

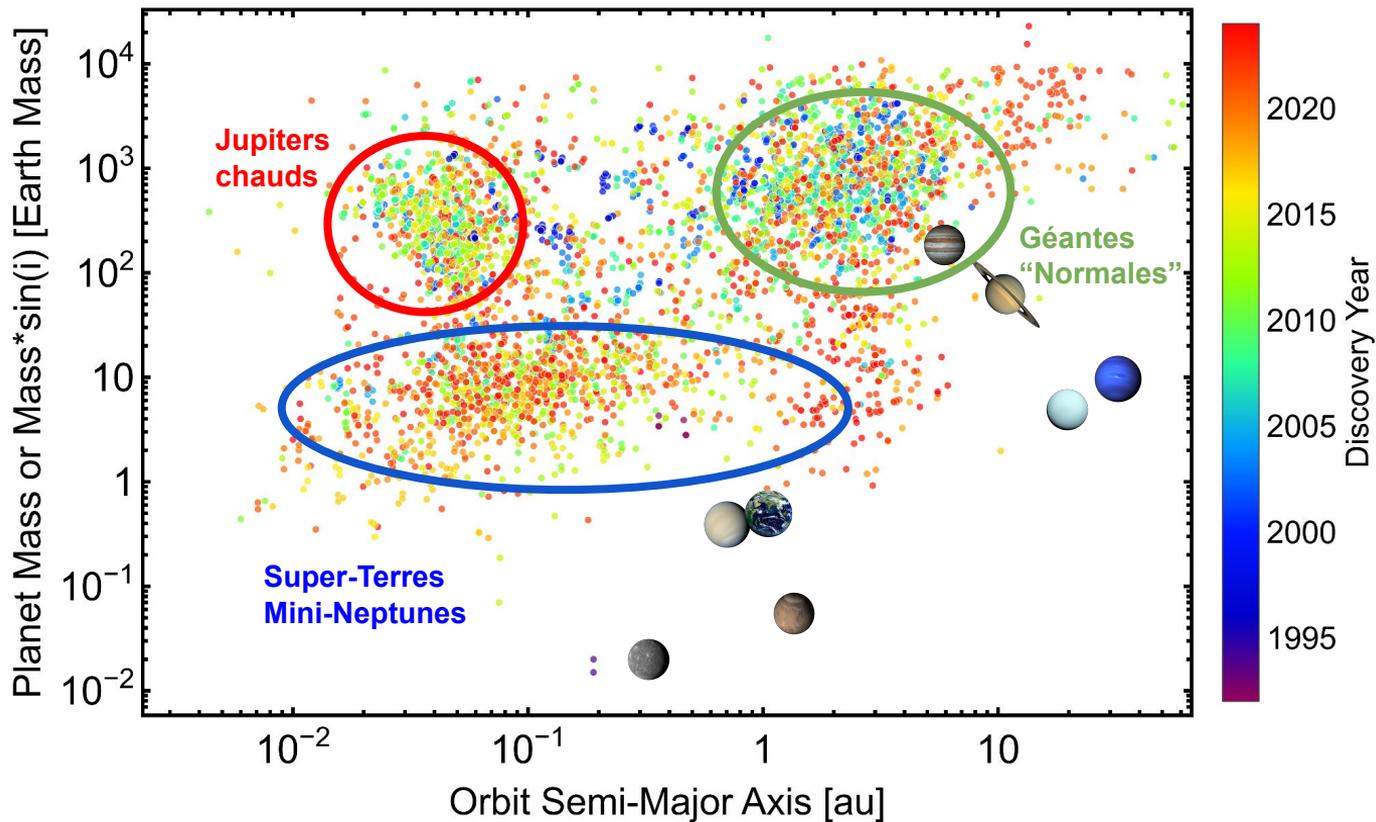
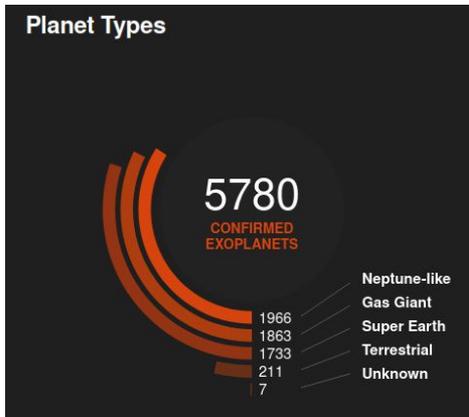
méthode des vitesses radiales $\Rightarrow M_p/M_*$
 méthode des transits $\Rightarrow R_p/R_*$

Avec la masse et le rayon on déduit une masse volumique que l'on compare à des modèles de structures planétaires.

On a également accès au spectre en transmission des exoplanètes en transit

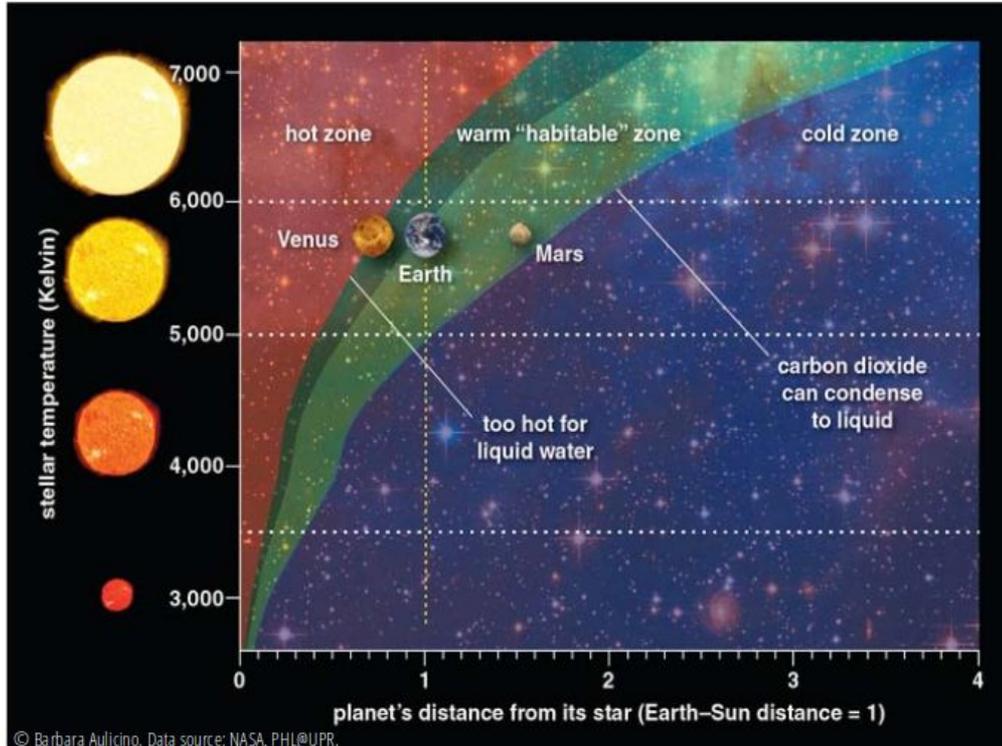


- Lava world with vaporized rock, $\chi^2 = 202$
- Grid fitted atmosphere models
- N_2 - CO_2 - CO , C/O = 0.5, $\chi^2 = 36$
- CO - H_2 - N_2 , C/O = 1, $\chi^2 = 32$
- Volatile atmosphere models with enhanced outgassing of rock-forming elements
- N_2 - CO , $\chi^2 = 101$
- Magma ocean-atmosphere models
- Earth volatile content, $f_{O_2} = 1W-4$, $\chi^2 = 30$
- 1% Earth volatile content, H-poor, $f_{O_2} = 1W$, $\chi^2 = 30$



✔ Habitabilité : pas si simple à définir

Une première définition simple : la zone habitable conservative (CHZ)



Région d'un système planétaire où la température et la pression de surface des planètes permettent l'existence d'eau liquide.



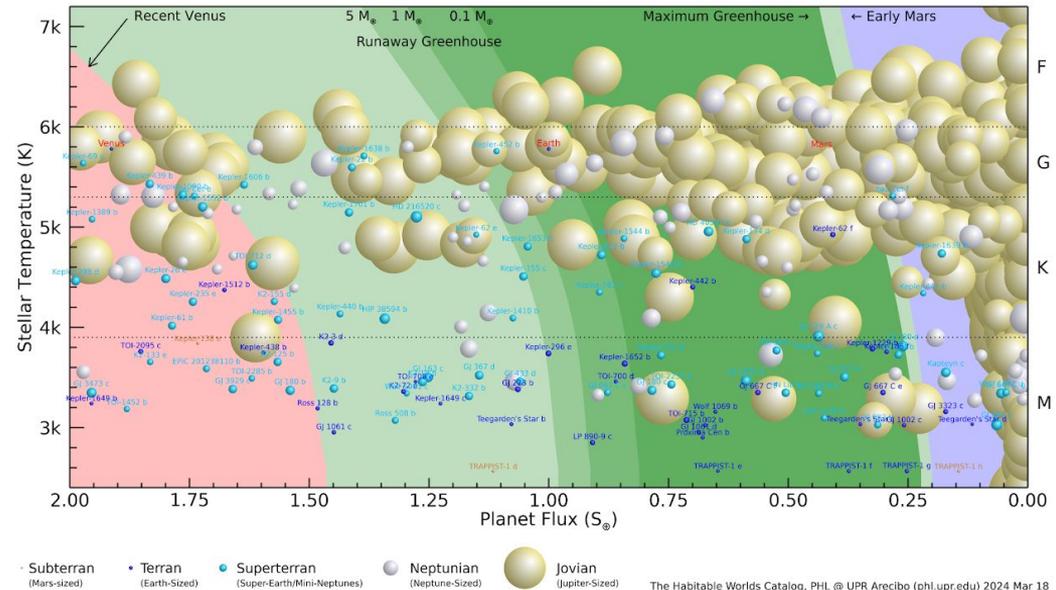
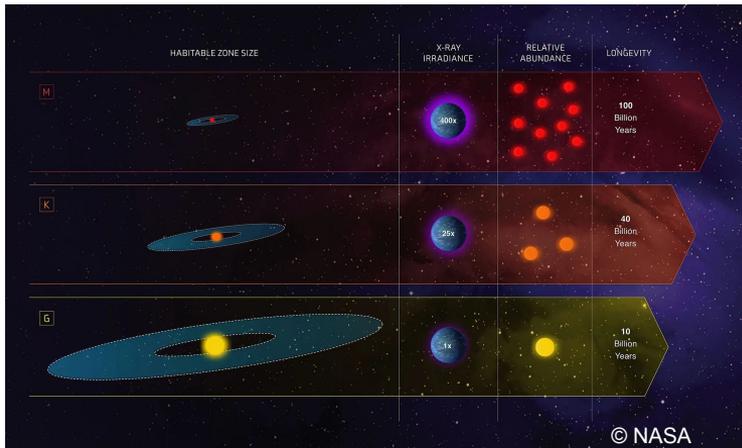
#OREME2024

✔ Habitabilité : pas si simple à définir

Plusieurs définitions de la zone habitable autour d'une étoile

Autres facteurs d'habitabilité:

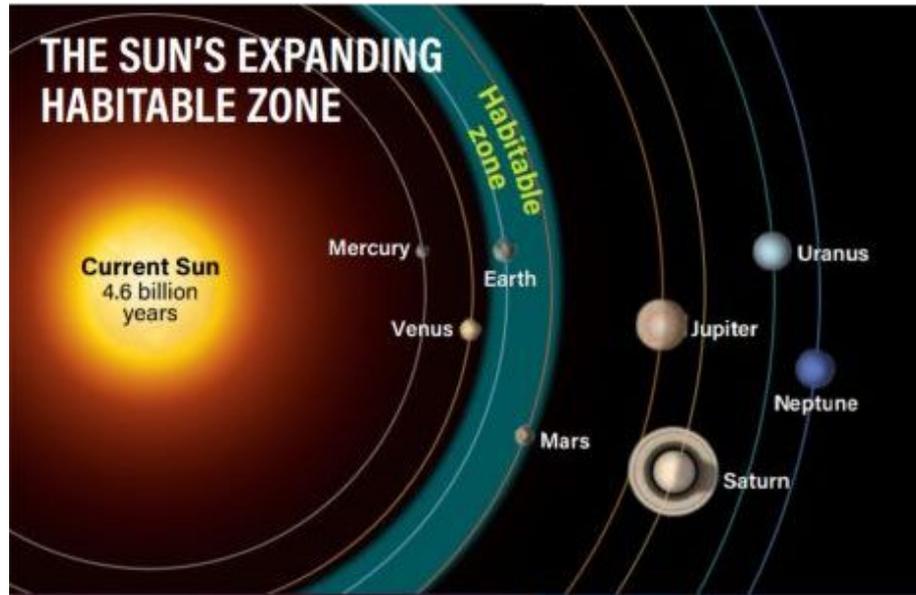
- l'irradiation de la planète
- le flux UV de l'étoile
- composition chimique atmosphérique
- stabilité de l'atmosphère
- ...



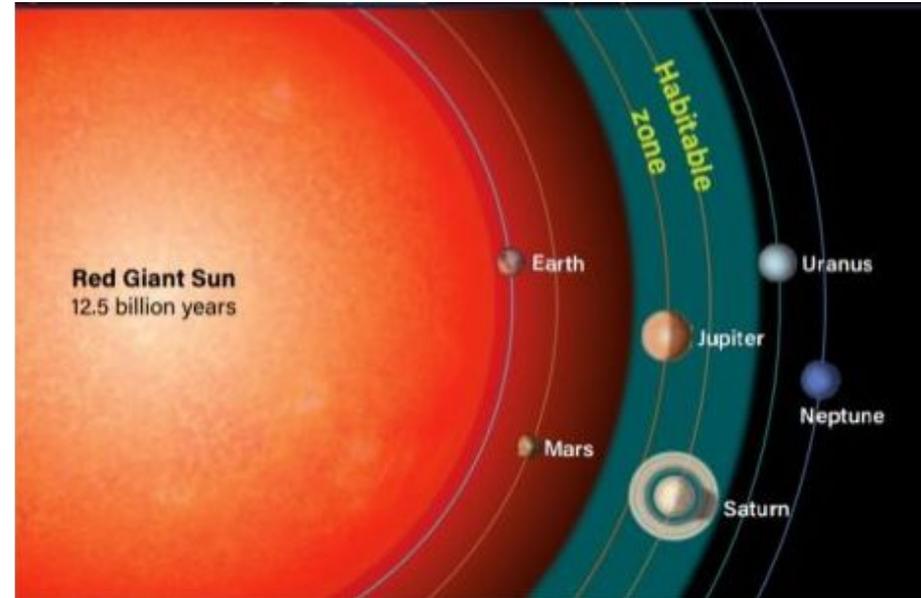
✔ Habitabilité : pas si simple à définir

La zone habitable évolue avec l'étoile...

Une (exo)planète dans la zone habitable n'est pas forcément habitée et pas vouée à y rester sur du (très) long terme



Le Soleil aujourd'hui

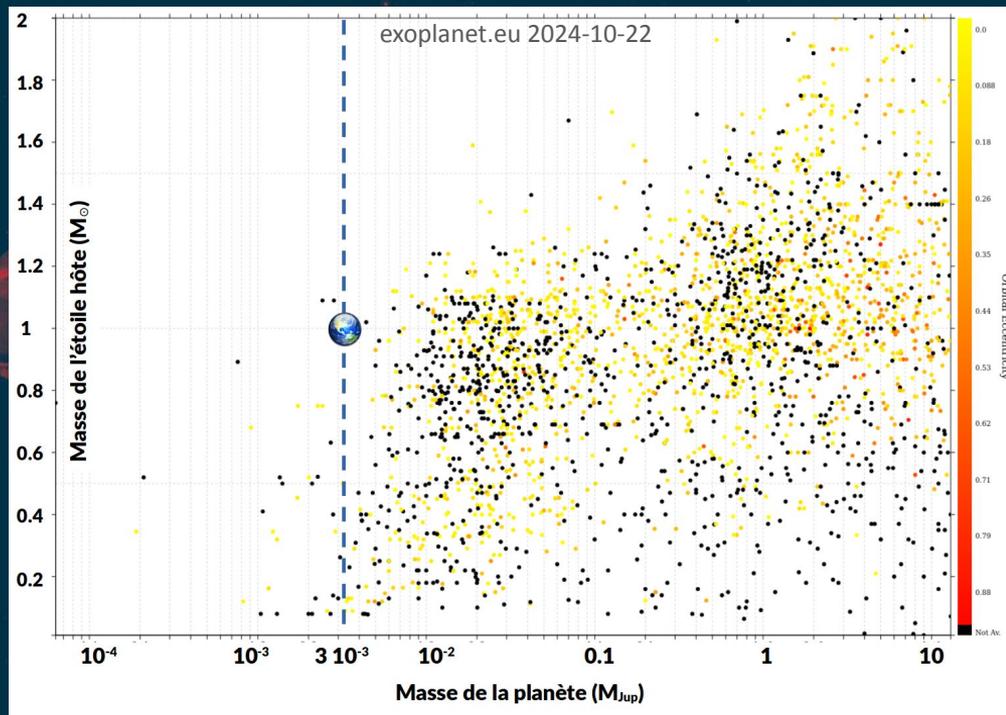


Le Soleil dans 8 milliards d'années

La mission PLATO



- ✓ Détecter des **exo-Terres** autour d'**étoiles proches de type solaire** par la méthode des **transits**
- ✓ **Caractériser les étoiles-hôtes**
- ✓ Déterminer avec **précision** les **masses, rayons et âges** des exoplanètes
- ✓ Etudier **l'évolution** des systèmes planétaires

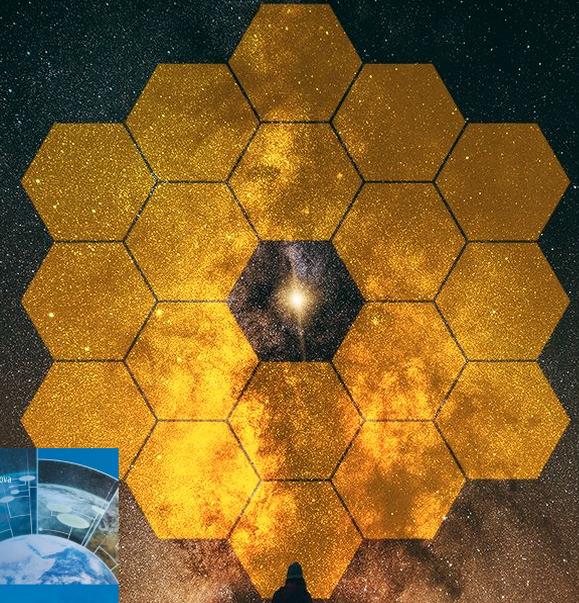


✓ Pas de planète B

- ✓ L'étude des **exoplanètes** nous sert à **comprendre la formation de notre système solaire** et potentiellement les **conditions d'apparition de la vie**
- ✓ Dans le système solaire, la conquête d'une autre planète n'est **pas envisageable** dans l'état actuel des connaissances scientifiques
- ✓ L'**exploration directe** d'exoplanètes est encore **hors de portée**

2022 EMMY® NOMINEE FOR OUTSTANDING SCIENCE AND TECHNOLOGY DOCUMENTARY

THE HUNT FOR PLANET B THE QUEST FOR ANOTHER EARTH BEGINS



Space and Society
Series Editor-in-Chief: Clara Anna Capova

Cyprien Verseux
Muriel Gargaud
Kirsi Lehto
Michel Viso Editors

Mars and the Earthlings:
A Realistic View
on Mars Exploration
and Settlement

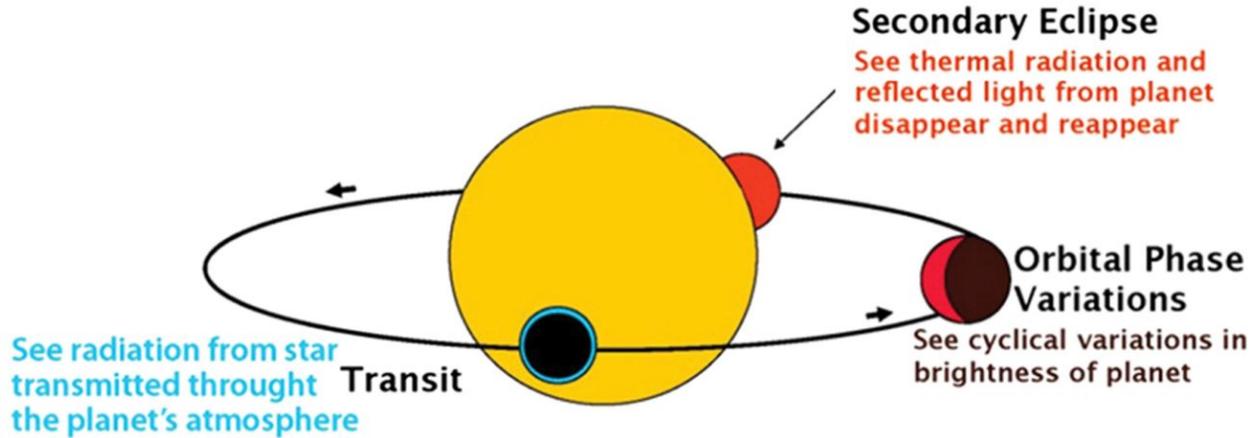
Springer

In association with CRAZY BOAT PICTURES presents a film by NATHANIEL KAHN "THE HUNT FOR PLANET B"
JHA EVERYS-MANLY CARLEEN BESTE MATT MOUNTAIN LAWRENCE D. BENVENSON BERRY CHRISTROM ALBERTO CONTI
NATHANIEL KAHN Music by PAUL LEONARD MORGAN Cinematography by ROBERT RICHMAN Edited by SABINE KRAVENGÜHL
Directed by NATHANIEL KAHN



✔ De la détection à la caractérisation

On peut également accéder à la composition chimique atmosphérique des exoplanètes lorsqu'elles sont observées en transit ou lors d'une éclipse par leur étoile.



The logo for OREME, featuring the letters 'OREME' in a white, sans-serif font. A stylized green leaf-like symbol is positioned above the 'E', and a horizontal white line is located below the letters.

OREME

A photograph of a narrow street in an urban area, heavily covered in colorful graffiti. The street is paved and appears to be in a state of disrepair or abandonment. The graffiti includes various tags and stylized letters in multiple colors like blue, yellow, red, and green.

Journée scientifique de l'OREME 2024

Comprendre les crues et inondations



Jean-Louis PERRIN

Chargé de Recherche, IRD

HydroSciences Montpellier

jean-louis.perrin@umontpellier.fr



#OREME2024

✔ Rappels historiques : les grandes inondations de la 2e moitié du XIXe siècle en France

- Les crues de la Loire de 1846, 1856 et 1866



Gravure dans « Étrennes orléanaises » – Almanach Année 1847 21, 22 et 23 Octobre 1846

En octobre 1846, le Val de Loire est inondé sur 60 km, des centaines de maisons et de bâtiments s'écroulent, les habitants meurent écrasés et noyés.

La crue de 1856 est l'une des premières à avoir un important impact médiatique. Lors des crues de 1856 et 1866 – Moins de pertes humaines, premières alertes grâce au télégraphe depuis les communes en amont.



- **La crue du Rhône de 1856**

Lyon subit d'importants dégâts. La rive gauche du Rhône, alors en construction, est particulièrement touchée.

La voie de chemin de fer entre Lyon et St Etienne est coupée et la commune de Givors est sous les eaux !

Toute la vallée du Rhône est sous les eaux jusqu'à Arles.



Prise en compte des politiques : Visite de Napoléon III en basse vallée du Rhône.



#OREME2024

- **La crue de la Garonne de 1875**

Certainement la pire inondation qu'est connue la France.

Dans la nuit du 23 au 24 juin 1875, Toulouse est ravagée par une crue subite du fait des fortes pluies et de la fonte des neiges sur le massif pyrénéen.

On décomptera 476 morts sur cet événement, dont 209 à Toulouse.

Prise en compte des politiques : avec la phrase restée célèbre « Que d'eau, que d'eau ! » prononcée par le Maréchal-Président Mac Mahon lors de sa visite à Toulouse.

Et l'on peut encore en citer de nombreuses autres comme la crue de la Seine en 1910. Ces crues restent encore aujourd'hui des références.



✔ Un responsable

Le déboisement généralisé de la France



Jarjayes,
Hautes-Alpes

Hier ...
et aujourd'hui

✔ Quatre grands types d'inondations

Par ruissellement

L'inondation par ruissellement se produit lorsque les eaux de pluie ne peuvent pas ou plus s'infiltrer dans le sol. D'une façon générale, le développement des surfaces imperméabilisées est une cause et un facteur aggravant du ruissellement.

Surtout connues en milieu urbain, lors de pluies intenses. Les débits d'eau de ruissellement peuvent être très importants et saturer les réseaux d'évacuation des eaux pluviales et les ouvrages hydrauliques.

Les débordements occasionnés s'effectuent alors en empruntant généralement les rues avec des vitesses importantes combinées à des hauteurs d'eau variables. Ils peuvent ainsi occasionner des dégâts humains et matériels conséquents.

Des exemples, quasi-quotidiennement ces derniers temps.

Un très grands nombres de causes et de facteurs aggravants



#OREME2024

✔ Quatre grands types d'inondations

Un très grands nombres de causes et de facteurs aggravants



Cas de la Vésubie en octobre 2020

Par débordement de cours d'eau

Liée à des pluies répétées, prolongées ou intenses (parfois cumulées avec la fonte des neiges sur les reliefs)

Les inondations par débordement de cours d'eau découlent de deux phénomènes :

- les crues lentes de plaine, relativement longues et qui peuvent persister d'une journée à plusieurs semaines.
- les crues rapides et torrentielles, qui se produisent principalement en zone montagneuse ou de relief marqué et surviennent à l'issue de précipitations intenses ou en période de fonte des neiges. Elles peuvent provoquer des inondations éclairs aux conséquences potentiellement dévastatrices.



#OREME2024

✔ Quatre grands types d'inondations

Par remontée de nappe

L'inondation est provoquée par des événements pluvieux exceptionnels qui engendrent une remontée des niveaux des nappes pouvant alors atteindre la surface du sol et provoquer une inondation.

La recharge des nappes a principalement lieu durant la période hivernale car cette saison est propice à l'infiltration d'une plus grande quantité d'eau de pluie : précipitations importantes, faible évaporation.

Elles sont, dans la plupart des cas, associées à des substrats géologiques spécifiques (i.e. craie de Picardie).

Un très grands nombres de causes et de facteurs aggravants



Pas-de-Calais, nov.2023 – janv. 2024

Inondations du Nord de la France durant l'hiver 2023/2024



#OREME2024

✓ Quatre grands types d'inondations

Un très grands nombres de causes et de facteurs aggravants



Par submersion marine

Les submersions marines sont des inondations rapides et de courtes durées de la zone côtière, par la mer, du fait de conditions météorologiques et marégraphiques particulières.

Elles sont déclenchées par le passage d'une tempête impliquant une chute de la pression atmosphérique, une forte houle augmentant le niveau d'eau à la côte (surcote) ainsi qu'un vent de mer (vent fort venant du large) renforçant l'accumulation de l'eau à la côte. Elles sont amplifiées lorsque les coefficients de marée sont élevés.

Les seules inondations non-directement reliées à la pluie.

Inondation de La-Faute-sur-Mer en février 2010 suite à la tempête Xynthia.



#OREME2024

Le risque d'inondation et les zones urbaines

Le risque d'inondation se caractérise par la **convergence** dans un même lieu

- d'un **aléa** ... dans notre cas la pluie et/ou l'un des phénomènes d'inondation que nous venons de décrire
- et d'**enjeux susceptibles de subir des dommages** ou des préjudices ... le plus souvent des **zones urbaines, industrielles ou commerciales**.

En France, le risque d'inondation est le **premier risque naturel** par l'importance des **dommages** qu'il provoque et le nombre de communes concernées. **18,5 millions de personnes** y sont exposées.

L'augmentation des surfaces imperméabilisées, souvent sur des zones peu propices à l'urbanisation (ZI des Paluds à Aubagne, ...) et les **phénomènes de ruissellement** qui y sont associés sont aujourd'hui un problème majeur.

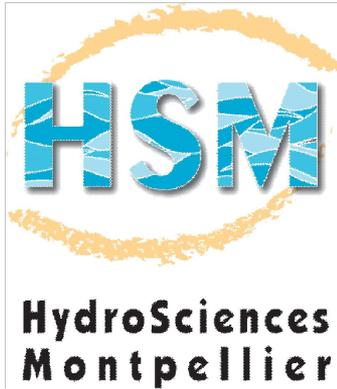
L'urbanisation crée de la vulnérabilité et amplifie l'aléa.

Ces problèmes sont d'autant plus importants dans les pays du Sud où l'urbanisation est souvent mal contrôlée avec le développement de **quartiers informels**, sans aucune infrastructure de drainage, à la périphérie des villes.



A **HydroSciences Montpellier**, nous nous intéressons essentiellement aux problématiques liées aux inondations par ruissellement en zones urbaines dans le cadre :

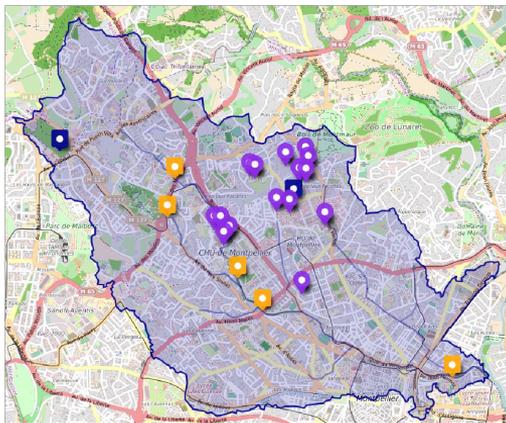
- d'une équipe de recherche : Hydrologie et Hydraulique Urbaine (H2U – coord. C. Salles)
- d'une Thématique Transversale : Eau dans la Ville (EdV – coord. V. Guinot)



#OREME2024

Observations

Sur 2 sites de mesures, à Montpellier (France) et à Abidjan (Côte d'Ivoire)



Site du Verdanson (Montpellier, France)

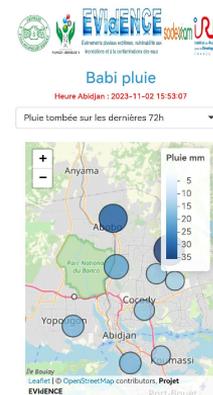
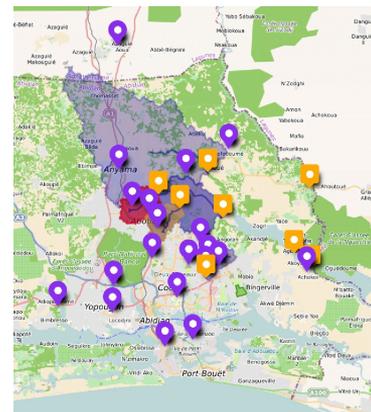
- Caractérisation de l'aléa pluvieux (Intensité-Durée-Fréquence)
- Variabilité spatio-temporelle des crues

<http://eauville.msem.univ-montp2.fr/index.php/presentation-2/site-verdanson>

Site de Riviera-Palmeraie et bassin versant de la rivière Djibi (Abidjan, Côte d'Ivoire)

- Pluies extrêmes, crues et inondations
- Contamination des eaux de surface
- Vulnérabilité environnementale, risques

www.babi pluie.org



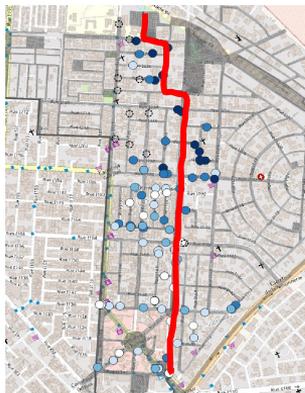
Le cas de Riviera-Palmeraie : crues et inondations du 13 au 17 juin 2024

De nombreux pays d'**Afrique** sont confrontés à une **recrudescence d'inondations** provoquées par des **pluies extrêmes**. Dans la plupart des cas, **ces inondations sont directement liées à une urbanisation mal maîtrisée** et à l'absence ou au sous-dimensionnement des **infrastructures de drainage**.

Abidjan, ville de 6 millions d'habitants n'échappe pas à cette situation. Chaque année, les pluies occasionnent des **dégâts matériels** et des **pertes en vies humaines** en particulier dans le quartier de Riviera-Palmeraie.

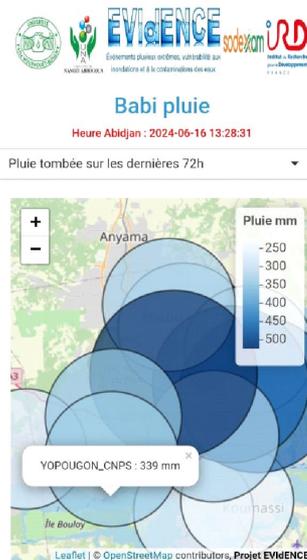
Le quartier de Riviera-Palmeraie est situé à l'aval d'un bassin versant très urbanisé de 7 km².

Il est traversé par un canal de drainage.



Observations

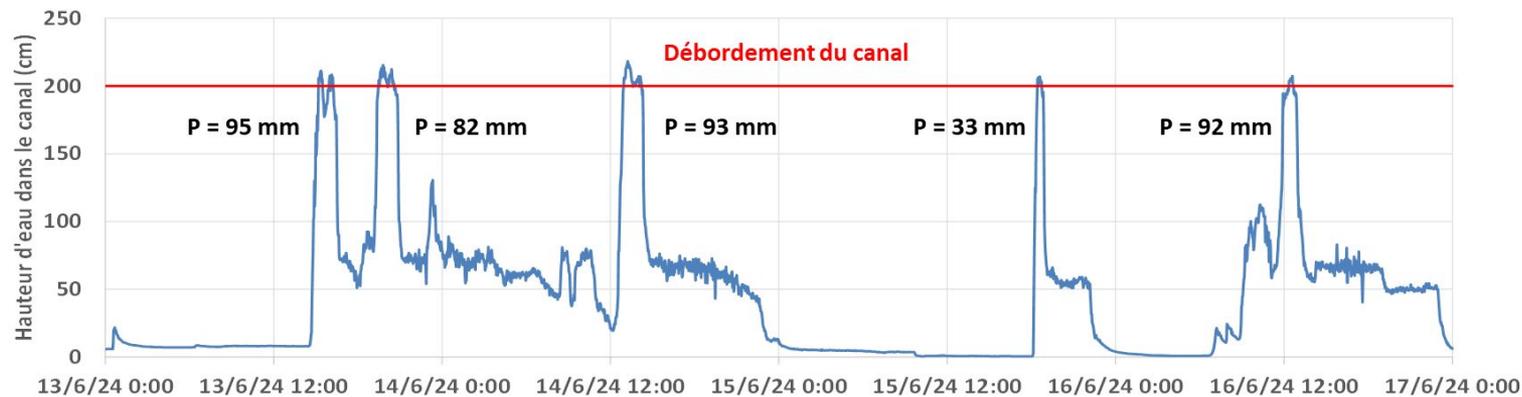
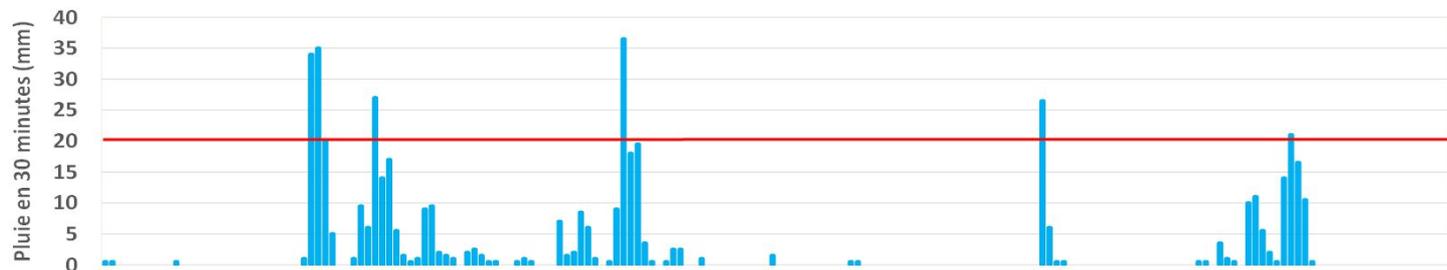
Du 13 au 16 juin 2024 De fortes pluies s'abattent sur Abidjan
... et le quartier de Riviera-Palmeraie est inondé à plusieurs reprises.



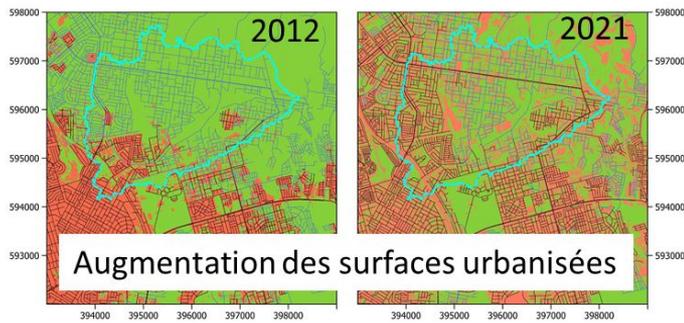
465 mm de pluie en 4 jours

Observations

Du 13 au 16 juin 2024 De fortes pluies s'abattent sur Abidjan

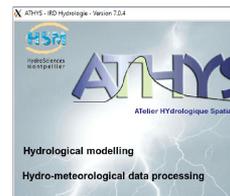


✓ Modélisation hydrologique : les crues



Site d'étude : Riviera-Palmeraie

- Evolution de l'occupation des sols (2012-2021)
- Observation des événements de crues

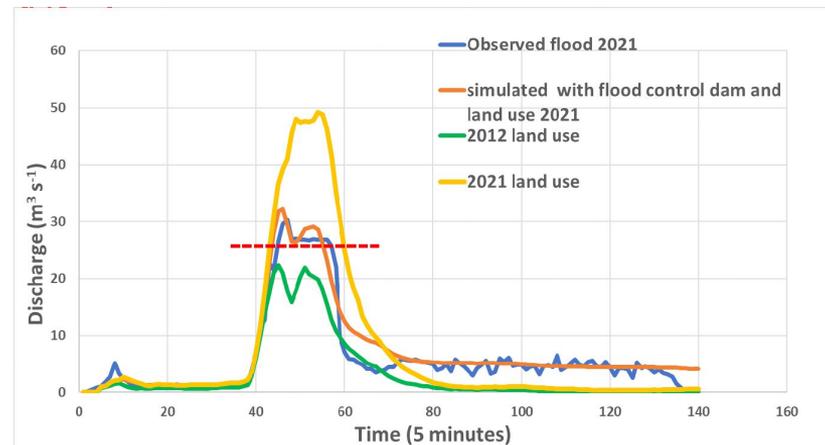


www.athys-soft.org

Calibration du modèle hydrologique distribué MERCEDES (plateforme ATHYS)

Simulation des événements de crue

- Pas d'inondation avec l'OdS de 2012
- Plus forte inondation avec OdS 2021 et sans barrage écrêteur de crue
- Bonne comparaison simul./obs. avec OdS 2021 et barrage écrêteur de crue



✓ Modélisation hydraulique : les inondations

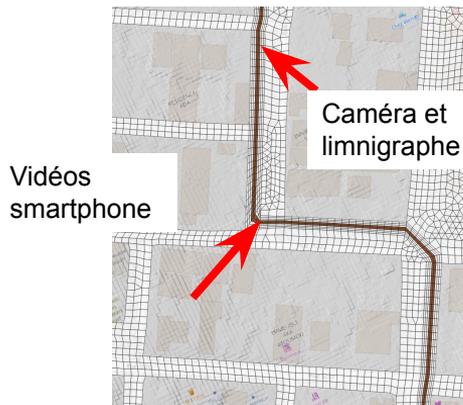
Site d'étude : Riviera-Palmeraie

Nombreuses données mobilisées:

Topographie fine (LiDAR fin)
Bâtiments et rues (OpenStreetMap)
Caractéristique du drain
(reconnaissance du terrain)

Données hydrauliques recueillies:

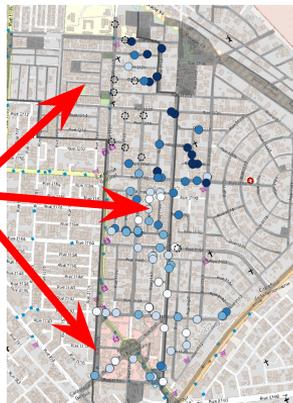
Débits amonts (modèle hydrologique)
Chroniques de hauteur (réseau de mesures)
Plus Hautes Eaux (retours d'expérience)
Vidéos/Vitesses (caméra fixe expérimentale)



Vidéos
smartphone

Caméra et
limnigraphe

Modélisation des rues et du drain
avec couches OSM et enquêtes de terrain
Maillage fins et topographie LiDAR



Retours d'expérience :
mesure des Plus Hautes Eaux



Hauteur d'eau modélisée pour évènement extrême
avec modèle calibré (friction-débit amont)

✓ Dynamique de transfert des polluants durant les crues



Site d'étude : bassin versant de la Djibi – 78 km²

- 700,000 habitants, habitats précaires
- eaux usées rejetées directement dans le système de drainage et le milieu naturel sans traitement préalable

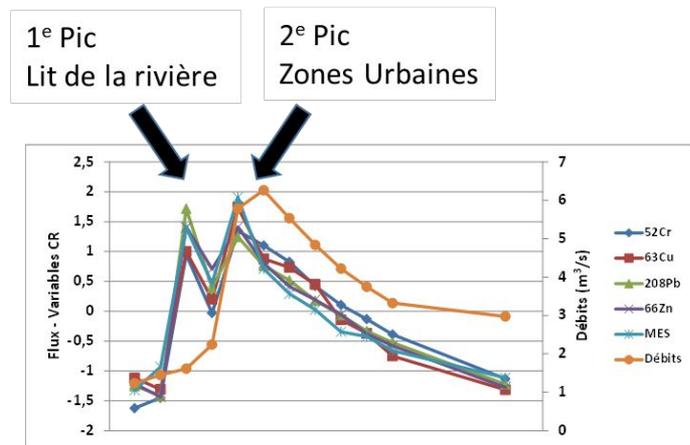
Djibi : principal tributaire de la Lagune Aghien identifiée comme ressource potentielle pour la production d'eau
Usine de potabilisation en cours de construction

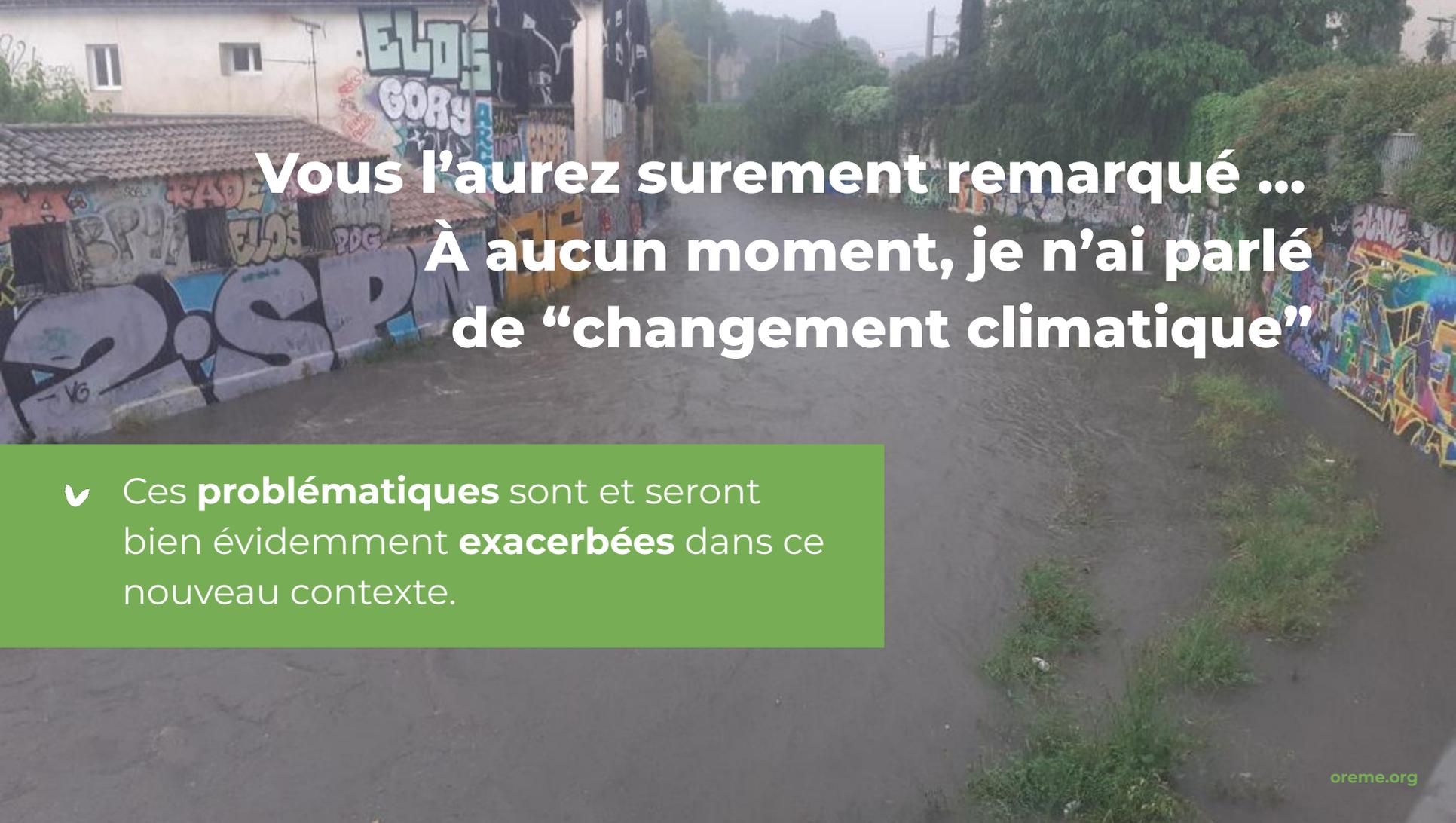
Transfert massif de polluants vers la lagune durant la crue.

Identification de 2 zones de stockage

- Le lit de la rivière Djibi
- Les zones urbaines du bassin versant

Fortes charges polluantes transférées durant la crue (24h) :
MES 100 tonnes – NT 4 t. – PT 0.5 t.





**Vous l'aurez surement remarqué ...
À aucun moment, je n'ai parlé
de "changement climatique"**

- ✔ Ces **problématiques** sont et seront bien évidemment **exacerbées** dans ce nouveau contexte.

OREME

Journée scientifique de l'OREME 2024

Interlude technique : la tour à flux



Jean KEMPF

Ingénieur d'étude, CNRS
jean.kempf@cefe.cnrs.fr



#OREME2024



✔ Qu'est ce qu'une tour à flux ?

- Quantifier les échanges de CO₂, de vapeur d'eau et d'autres gaz (CH₄, NO₂...)
- 2 types : atmosphérique et écosystème
- Une vingtaine en France
- Influence du climat sur un milieu homogène (forêts, cultures, aires urbaines...)

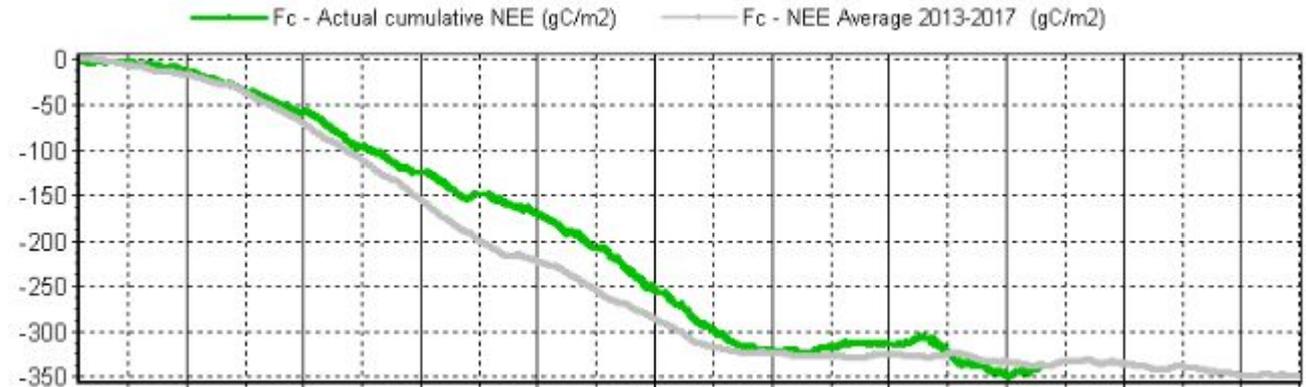




✔ A quoi sert cet équipement ?

La tour a flux est un outils permettant :

- Une meilleure compréhension des cycles du carbone : Photosynthèse vs respiration/décomposition
- D'étudier les interactions biosphère-atmosphère
- Améliorer les modèles climatiques grâce aux mesures de terrain



✔ Comment installer une tour à flux ?

Les étapes importantes

- ✔ Choix de l'emplacement
- ✔ Installation des capteurs : analyseur et anémomètre...)
- ✔ Calibration et maintenance
- ✔ Traitement des données

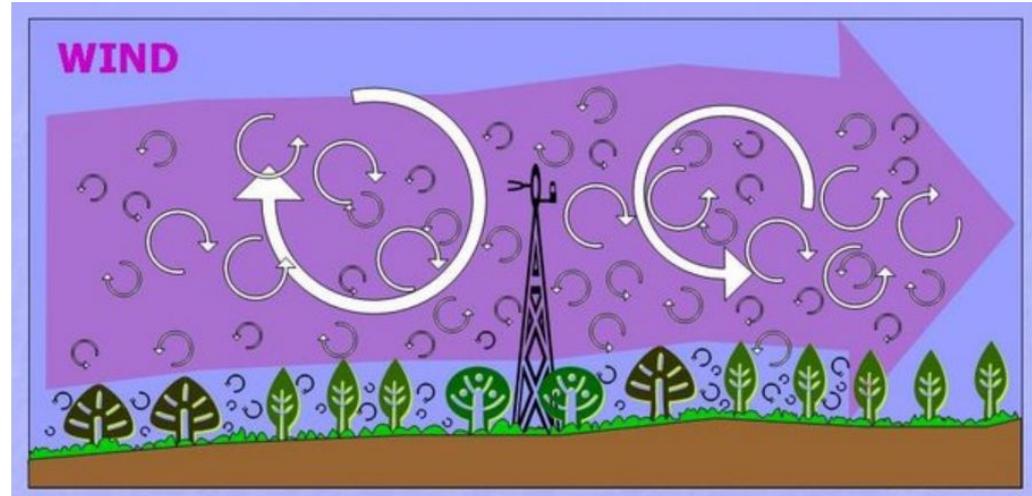




✓ Le principe de la mesure

Technique de mesure de flux turbulent ::

- Turbulence et tourbillons
- Mesure de la concentration du gaz et de la vitesse du vent
- Corrélation des données



✔ Collaboration et réseau

- A l'OREME : LISAH, CEFE, GM, HSM...
- Réseau structuré : ICOS, OZCAR, PEPR

ICOS

● ● ●
Integrated
Carbon
Observation
System



OZCAR



#OREME2024

OREME

Journée scientifique de l'OREME 2024

Aléa sismique en France métropolitaine : où sont les failles capables de générer des séismes modérés à forts ?



Jean-François RITZ

Directeur de Recherche, CNRS

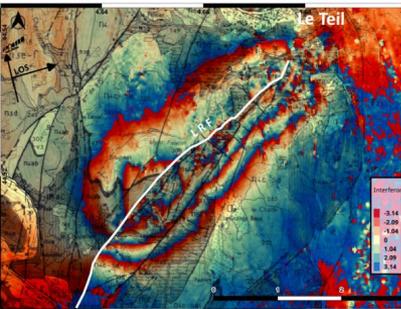
Géosciences Montpellier

jean-francois.ritz@umontpellier.fr



#OREME2024

✔ Où sont les failles capables de générer des séismes modérés à forts ?



Alea sismique

(paramètres géologiques)

Source sismique

(localisation, magnitude, fréquence)

Mouvement du sol (accélération)

Effets de site:

(liquéfaction, glissement de terrain
amplification topographique ..)

X

Vulnérabilité

(paramètres humains)

Bâti

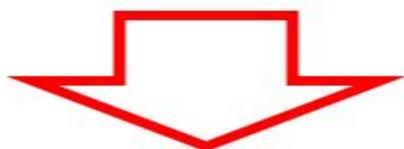
(types de construction, matériaux,..)

Préparation

(gestion de crise, secours, ..)

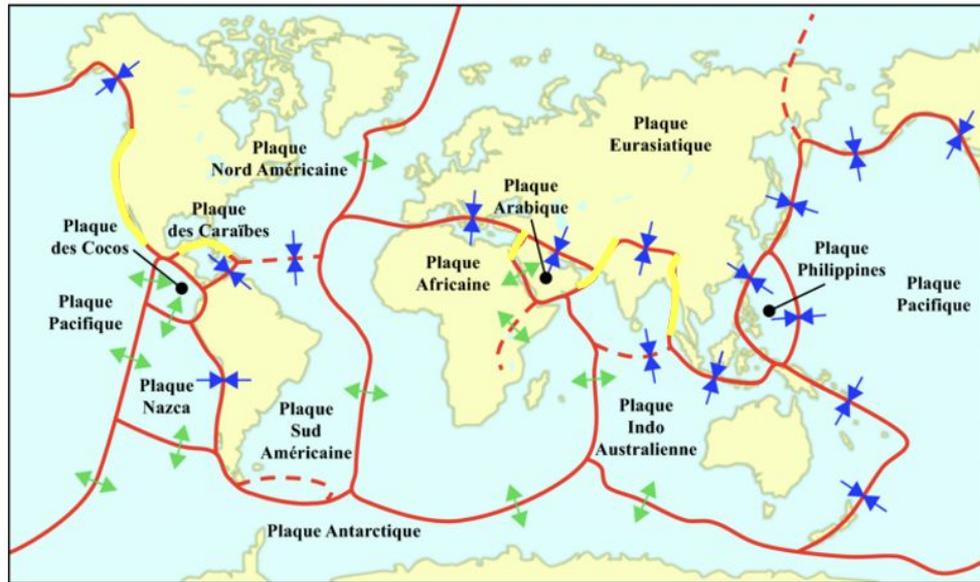
Enjeux

(société, économie, environnement,..)



Risque sismique

- L'enveloppe de la terre est composée d'~12 plaques lithosphériques qui se déplacent les unes par rapport aux autres

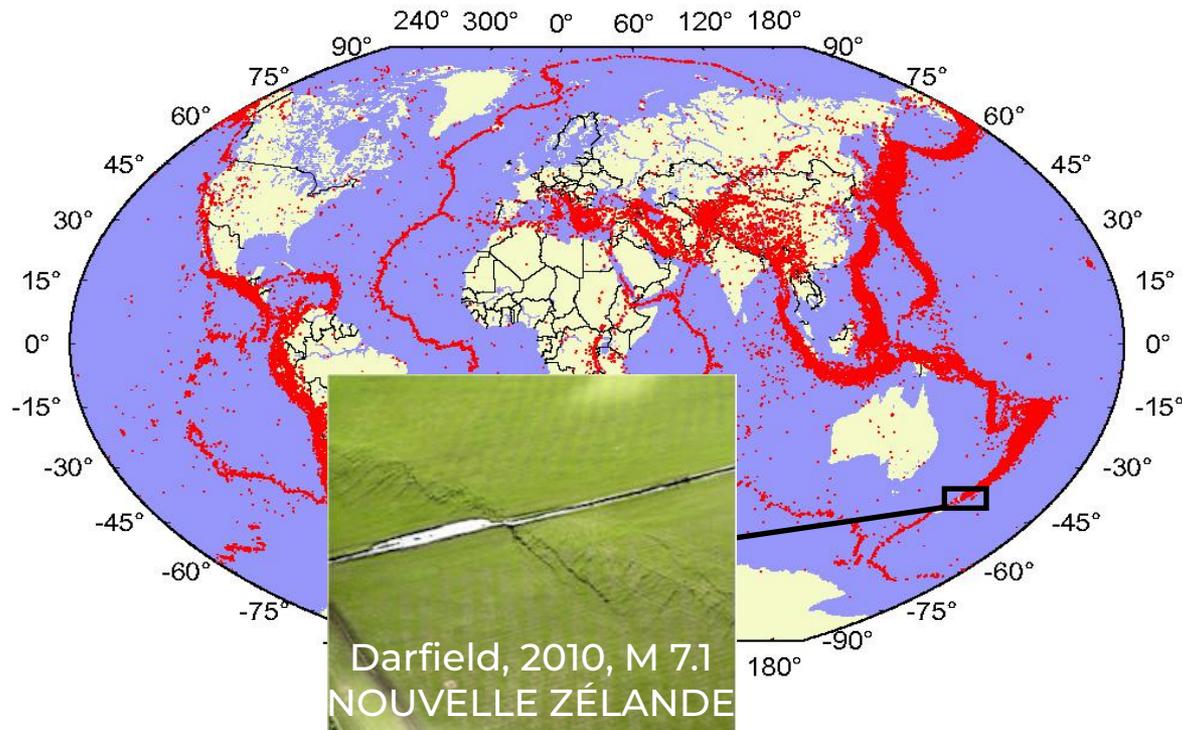


- Ces déplacements génèrent **aux limites** des plaques des déformations **en extension**, en compression, ou en décrochement

👉 **On parle de tectonique des plaques**

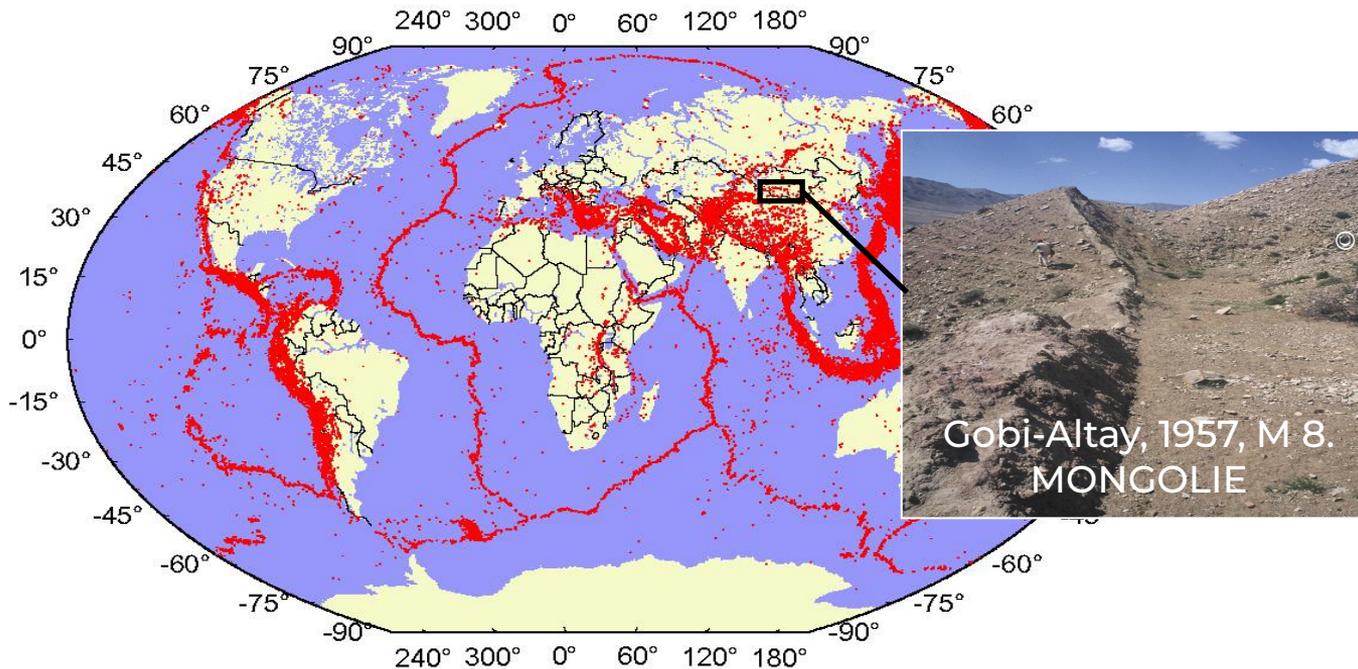


✔ Carte des séismes dans le monde (~ 100 ans d'enregistrement)



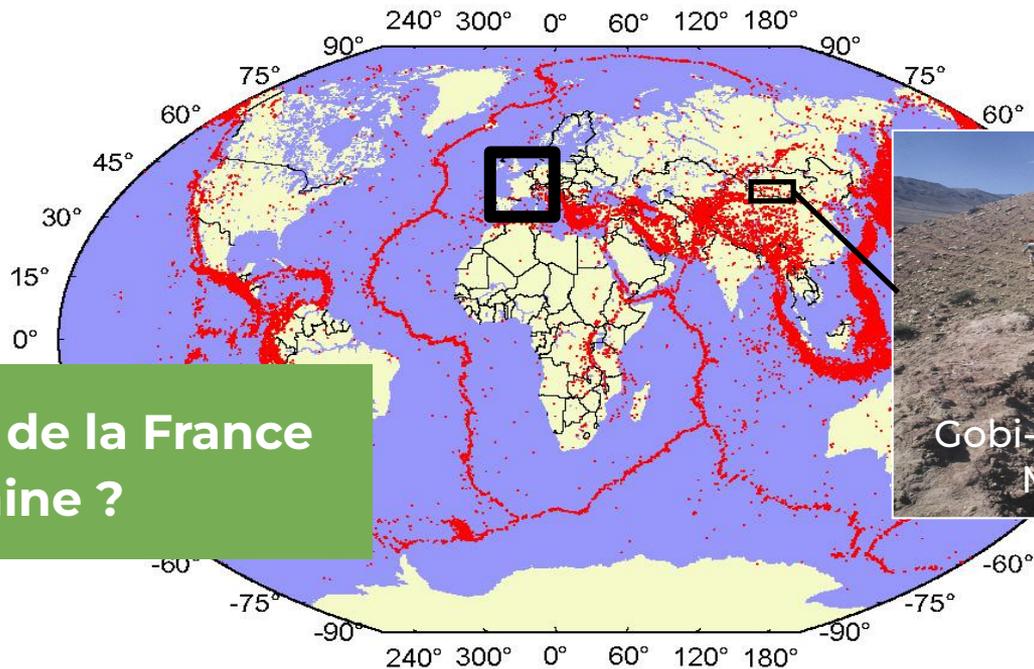
Les séismes se produisent essentiellement à l'interface
entre les plaques tectoniques.

✔ Carte des séismes dans le monde (~ 100 ans d'enregistrement)



Mais des séismes se produisent également à l'intérieur des plaques
on parle de domaines intraplaques.

✔ Carte des séismes dans le monde (~ 100 ans d'enregistrement)



Qu'en est-il de la France
métropolitaine ?

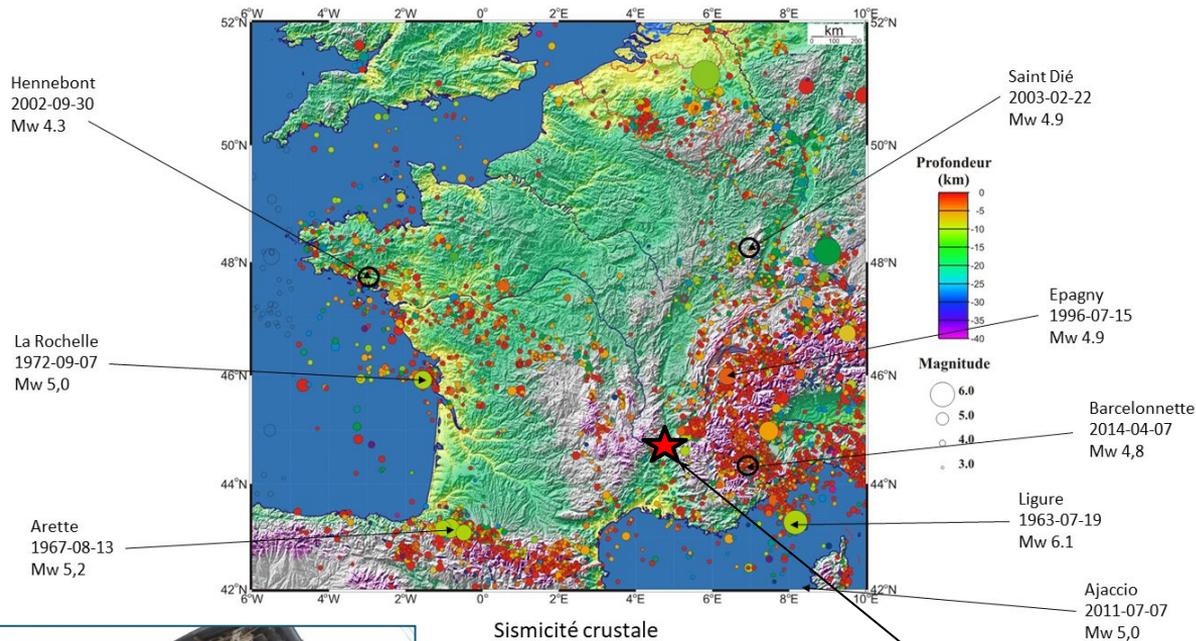
Gobi-Altay, 1957, M 8.
MONGOLIE

Mais des séismes se produisent également à l'intérieur des plaques
on parle de domaines intraplaques.



#OREME2024

1962 - 1995



Sismicité crustale

Séisme du Teils (11-11-2019, M_w 4.9)

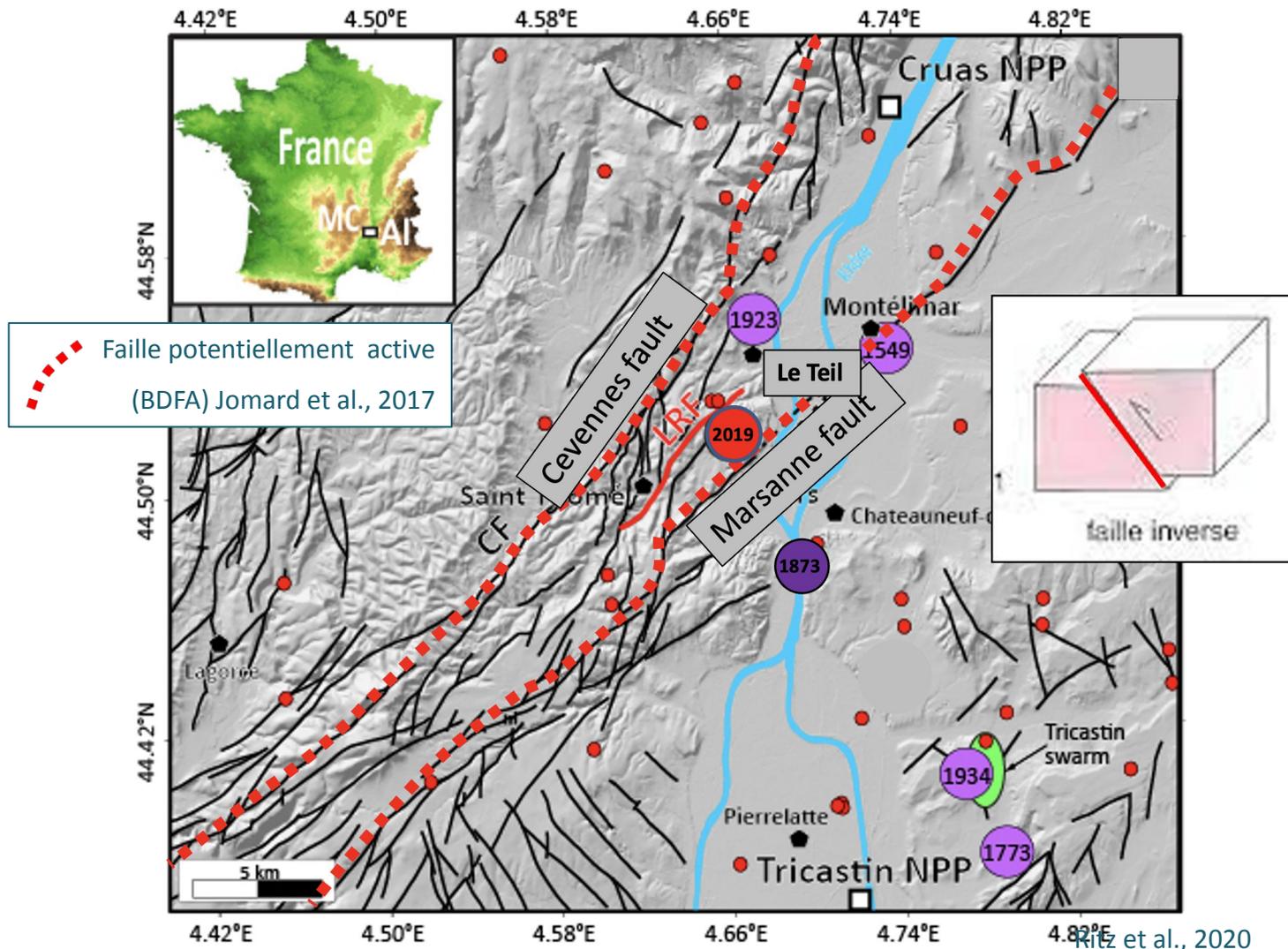
- Séisme le plus destructeur depuis le tremblement de terre d'Arette (Pyrénées) en 1967 (ML 5.3, MSK VII-VIII)
- Perte économique ~50 M€.



<https://cdn-s-www.ledauphine.com/images/479>

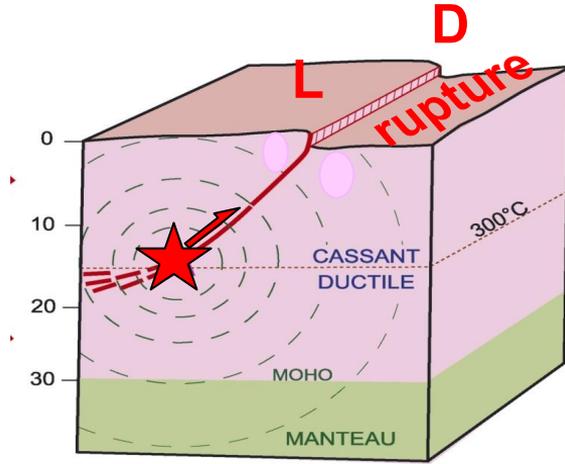


#OREME2024



✔ Le séisme du Teil a généré une **rupture de surface** le long de la Faille de la Rouvière (système de failles des Cévennes).





Un séisme = un déplacement soudain le long d'une faille + libération d'ondes élastiques

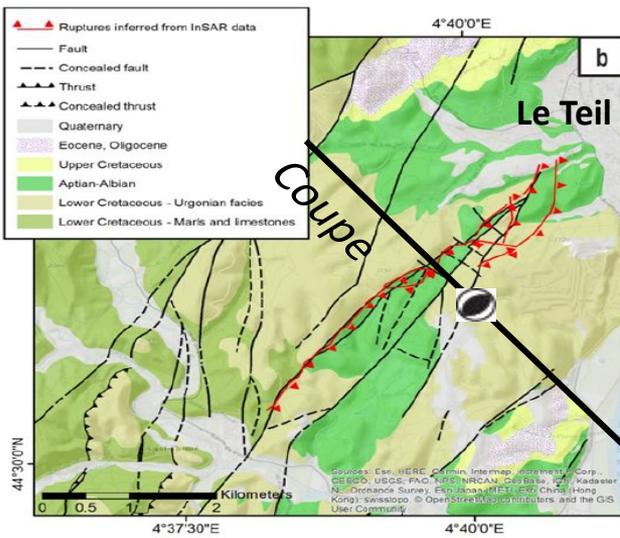
Magnitude	Longueur (km)	Déplacement (m)
M_w	L	D
9	1000	15
8	300	5
7	50	1.5
6	10	0.2
5	3	0.05
4	1	0.02

La rupture atteint la surface

$$M_w = 2/3 \log (\mu * L * l * D) - 6.1$$

(μ = module de cisaillement = 3.10^{10} Pa)





Faille de la Rouvière

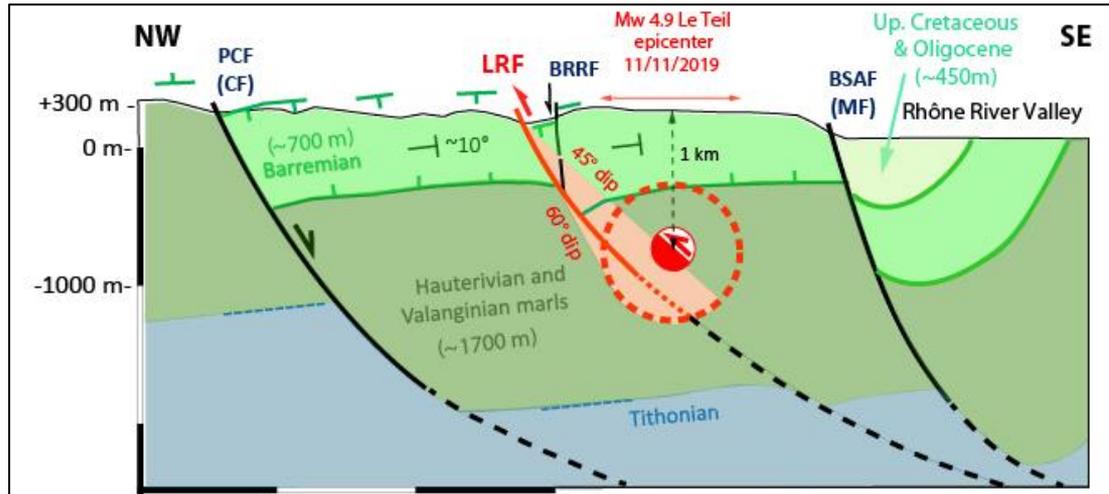
Source du séisme du Teil Mw 4.9 du 11-11-2019

Première rupture de surface observée (« en direct ») en France métropolitaine dans la période historique

Très fort mouvement du sol (localement > 1g)

Causse et al., 2021

Ritz et al., 2020



#OREME2024

✔ Le séisme du Teil a immédiatement soulevé de nouvelles questions sur le plan de l'aléa sismique



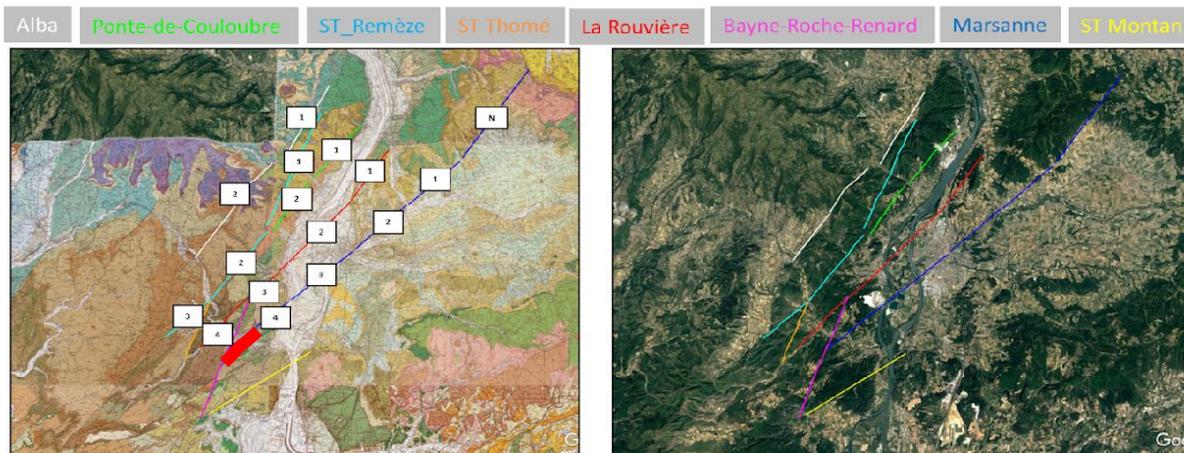
Carte des failles potentiellement actives (BDFA - IRSN)
(Jomard et al., 2017)
(fond de carte géologique du BRGM 1/50.0000)

- La faille de la Rouvière a-t-elle joué dans le passé, ou est-ce la première fois qu'elle est réactivée depuis l'Oligocène ?
- Les autres failles du système cévenol pourraient-elles se comporter de la même manière ?
- Y'a-t-il une faille principale dans le réseau cévenol qui absorbe l'essentiel de la déformation ?



✓ Projets CNRS-INSU « Rupture du Teil » 2019-2020 et projet collaboratif « FREMTeil » 2021 -2024

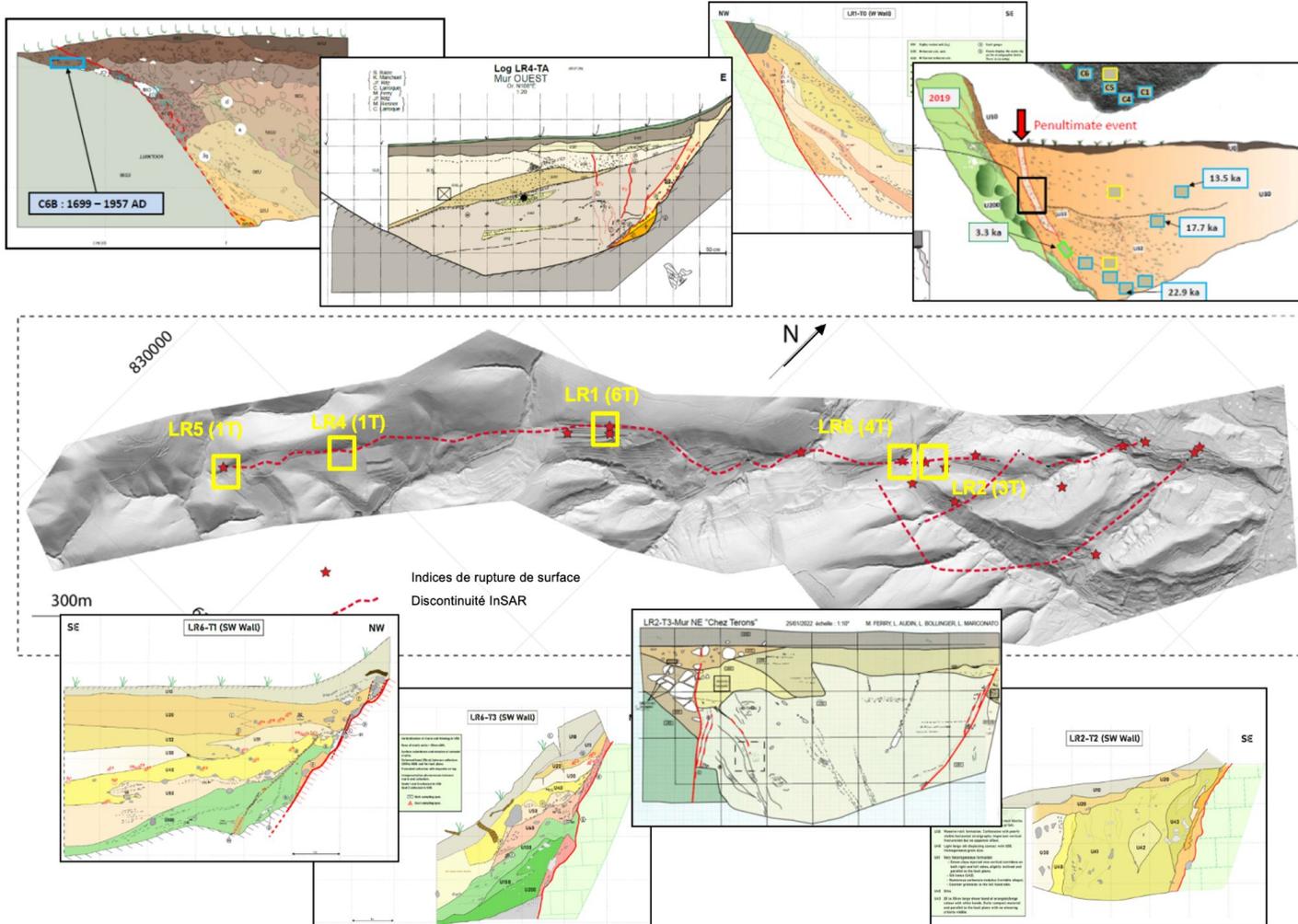
<https://www.epos-france.fr/blog/2024/10/21/le-projet-fremteil-se-terme-reunion-bilan-a-viviers-avec-les-habitants/>



- **Paléosismologie** (8 failles principales subdivisées en une 20aine de segments).
Ont-ils généré des séismes avec rupture de surface pendant la période Quaternaire ?
2 thèses de doctorat de l'Université de Montpellier : N. Cathelin 2024 et C. Thomasset 2024 .
- **Sismologie** (e.g. C. Cornou et collaborateurs) > vitesses des ondes sismiques dans la croûte supérieure (meilleure localisation), relation magnitudes-intensités, cartographie des dégâts et mouvements du sol.
- **Rhéologie** (e.g. J-P Ampuéro et collaborateurs) > forages au travers de la faille de la Rouvière (analyse des paramètres mécaniques de la rupture).

Paléosismologie le long de la faille de la Rouvière





(LRF) Paléosismologie du segment qui a cassé en 2019 : 15 tranchées / 5 sites

NW

LRI-TB (mur NE)

Zone de faille : clates (gélifractes) alignés avec fissure remplie de calcite cristallisée



SE



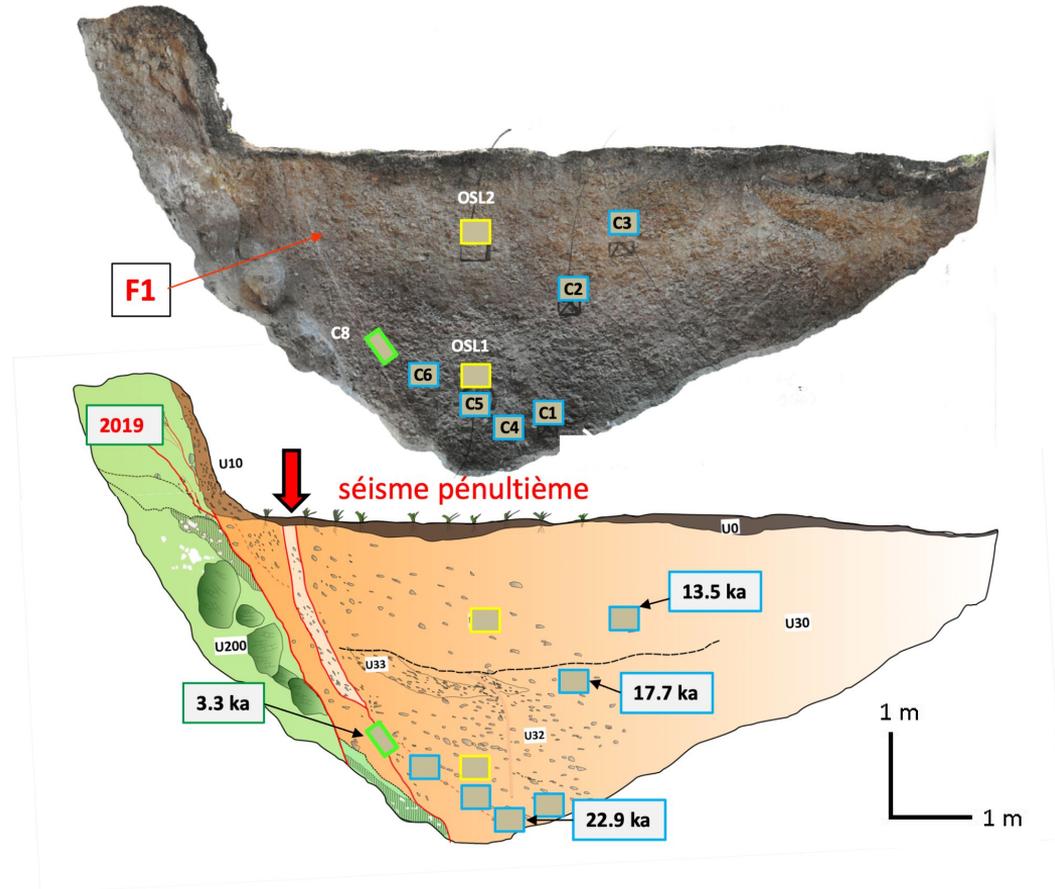
#OREME2024

NW

SE

LR1-TB (mur NE)

Interprétation
préliminaire :
**au moins une
paléorupture de
surface entre
13570 et 3300
ans le long du
segment central
de la Rouvière**



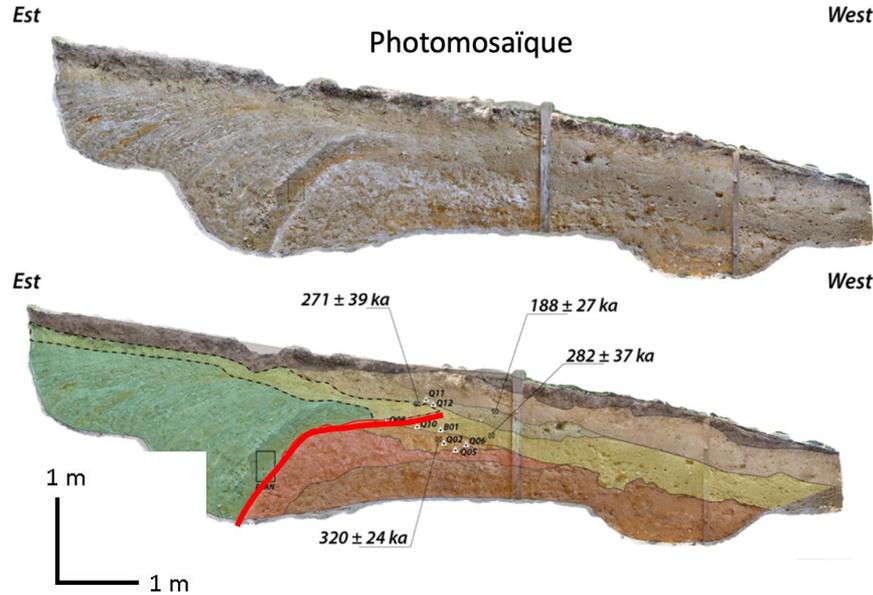
Ritz et al. , EGU 2021;
AGAP 2022, Patadays 2022



#OREME2024

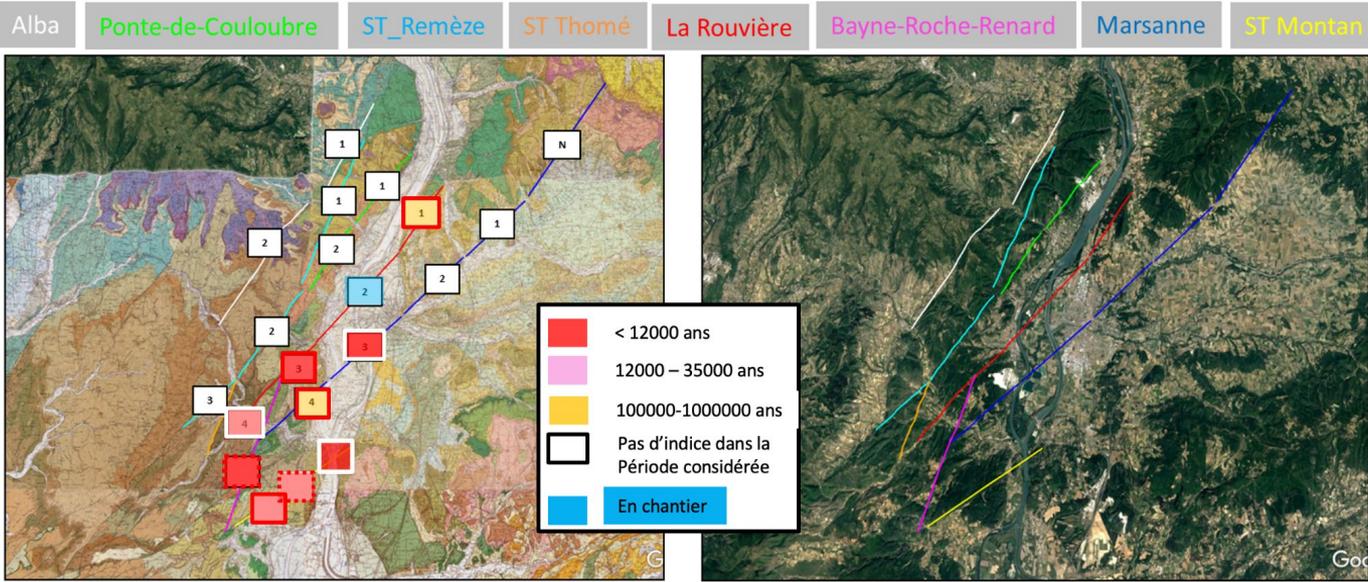
Autre exemple de paléorupture sur une autre faille du système cévenol : la faille de Marsanne

Formations du Crétacé chevauchant des dépôts quaternaires.



Thomasset C., Thèse 2024
Univ. Montpellier

✓ Au moins un événement (peut-être 2) entre **344000 et 232000 ans**.
Déplacement minimum de 0,5 m (\geq Mw 5.8).



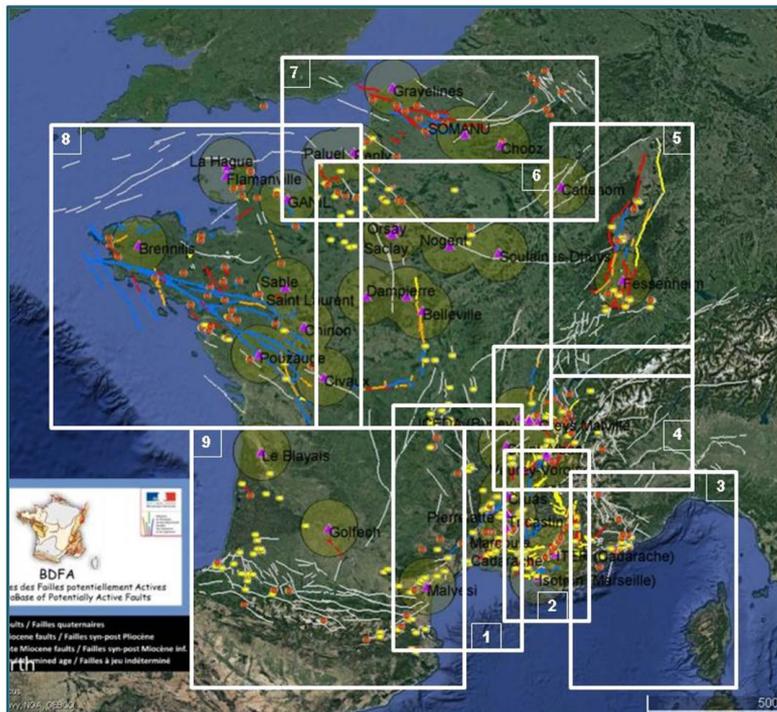
- ☛ L'analyse paléosismologique suggère que plusieurs segments du système de failles des Cévennes ont généré des séismes avec rupture de surface ($M_w > 5$) au cours de la période Quaternaire (Failles de la Rouvière, de Marsanne, de Saint-Montan, de Grangette, de Bayne-Roche-Renard) (thèses de de doctorat de l'Université de Montpellier de C. Thomasset 2024 et N. Cathelin 2024).
- ☛ Le fait que ces événements ne soient pas conservés dans la morphologie s'explique par les faibles déplacements de surface et une longue période de retour, cohérent avec le faible taux de déformation mesuré par GPS dans cette région ($0,5-1,0 \times 10^{-9}$ an $^{-1}$).
- ☛ Il est important de poursuivre ces investigations pour compléter l'analyse sur l'ensemble du système de failles des Cévennes, mais aussi de mener le même type d'analyses sur les autres grands systèmes de failles en France métropolitaine

« **Fautes ACTives France** » (**FACT**) / Axe 5 - ATTS-sismicité (resp F. Masson)

Contacts: J-F Ritz (Géosciences Montpellier) et S. Baize (IRSN), suppl. L. Audin (Isterre)

Jean-Francois.Ritz@umontpellier.fr, stephane.baize@irsn.fr, Laurence.Audin@ird.fr,

<https://www.epos-france.fr/actions-epos-france/atts-sismicite/>



RÉFÉRENTS ACADÉMIQUES / RÉGION :

Région 1 : Languedoc-Cévennes-Provence occid. / Géosciences Montpellier
J-F Ritz (M. Ferry), / <Jean-Francois.Ritz@umontpellier.fr>

Région 2 : Provence / CEREGE
M. Rizza (L. Siame, O. Bellier) / <rizza.magali@uqam.ca>

Région 3 : Sud-Est – Cote d’Azur – Alpes du Sud / Géosciences Azur
C. Larroque (F. Leclerc) / <larroque@geoazur.unice.fr>

Région 4 : Alpes-Nord – Jura Méridional / Isterre
L. Audin & R. Vassallo / Laurence.Audin@ird.fr, Riccardo.Vassallo@univ-smb.fr

Région 5 : Fossé-Rhénan - Jura / EOST (+ coll LCE Besançon, CRPG Nancy)
J. Van-der-Woerd / <jerome.vanderwoerd@unistra.fr>

Région 6 : Centre - Bassin parisien – Nord Massif Central / IPGP (+ coll UPMC)
Y. Klinger & M. Cushing / <klinger@ipgp.fr>, <edward.cushing@irsn.fr>

Région 7 : Nord / LOG Lille (en coll. avec le Royal Observatory of Belgium)
F. Graveleau / <fabien.graveleau@univ-lille.fr>

Région 8 : Bretagne-Normandie / LPG Nantes (en coll avec LGO Brest)
C. Perrin (C. Authemayou) / <clement.perrin@univ-nantes.fr>, <christine.authemayou@univ-brest.fr>

Région 9 : Pyrénées / Univ. Nac. Auton de Mexico – Géosciences Pau (+ coll. avec Barcelone)
F. Lacan & T. Cavailles / <Placan@geociencias.unam.mx>, <thibault.cavailles@u-bordeaux.fr>

RÉFÉRENTS INSTITUTIONNELS et PRIVÉS (toutes régions)

IRSN: **H. Jomard** CEA: **L. Bollinger** EDF: **K. Manchuel & R. Le Roux-Mallouf** BRGM: **R. Hoste-Colomer & C. Allanïc** GINGER: **B. Whitney & R. Kurtz** ANDRA: **F. Ego** SEISTER: **A. Poujol**

M. Iefevre

Y. Benjelloun



Failles Actives France (FACT)

Accueil / Bases de données / Failles Actives France

EPOS-FR
EUROPEAN PLATE OBSERVING SYSTEM FRANCE

Contact

Jean-François Ritz Stéphane Baize Laurence Audin

Labellisation

RESIF Action Transverse Sismicité

Du point de vue sismotectonique, la France métropolitaine comme ses pays voisins de l'Europe de l'Ouest peut être définie aujourd'hui comme une région continentale stable (SCR) à fort héritage structural et faible taux de déformations.

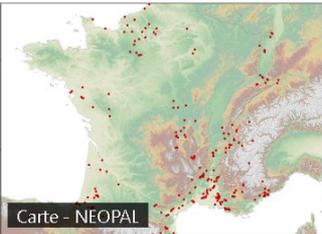
L'axe « Failles actives France » a pour objectif de mieux comprendre la sismicité associée aux failles actives en France et les processus à l'origine de cette sismicité, en constituant une base de données la plus complète possible des failles actives au Quaternaire.

Pour ce faire 2 démarches sont mises en œuvre :

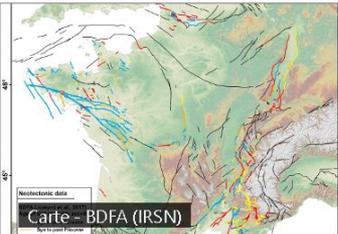
- la réévaluation critique et objective (débats contradictoires, visite de terrain le cas échéant) des bases de données des failles potentiellement actives en France: BDFA (IRSN, publiée en 2017) et Neopal (BRGM). Voir les cartes ci-dessous.
- le lancement de nouvelles investigations mettant en œuvre les méthodes et techniques de l'analyse morphotectonique et paléosismologique les plus appropriés pour déceler et caractériser les failles actives dans ce contexte SCR (e.g. MNT très haute résolution, géophysique de sub-surface type UHRS, ensembles des datations du Quaternaire : 14C, OSL, ERS, isotopes cosmogéniques) et ainsi caractériser leur activité sismique la plus récente (i.e. 10 Ka- 1Ma).

L'axe FACT regroupe un grand nombre de collègues (académiques et institutionnelles) expertes en tectonique active et/ou dans les méthodes qui lui sont associées, et se répartit en 9 régions sur le territoire métropolitain.

[Voir les référents de l'axe Failles Actives - France de l'action transverse sismicité Résif](#)



Carte - NEOPAL



Carte - BDFA (IRSN)



in progress

FACT Data Base

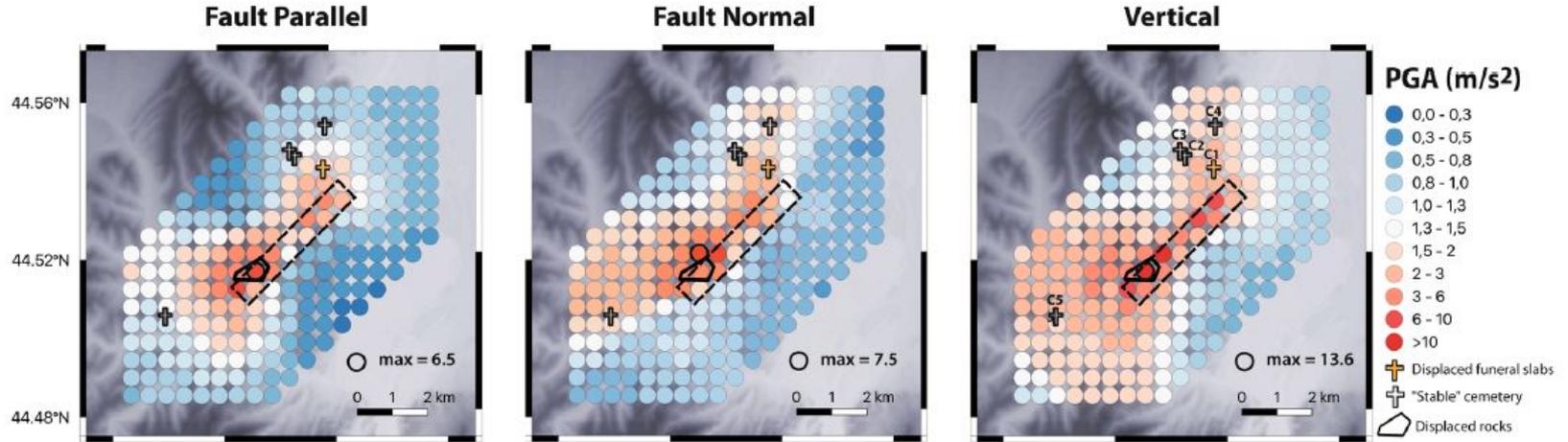
Merci pour votre attention

!

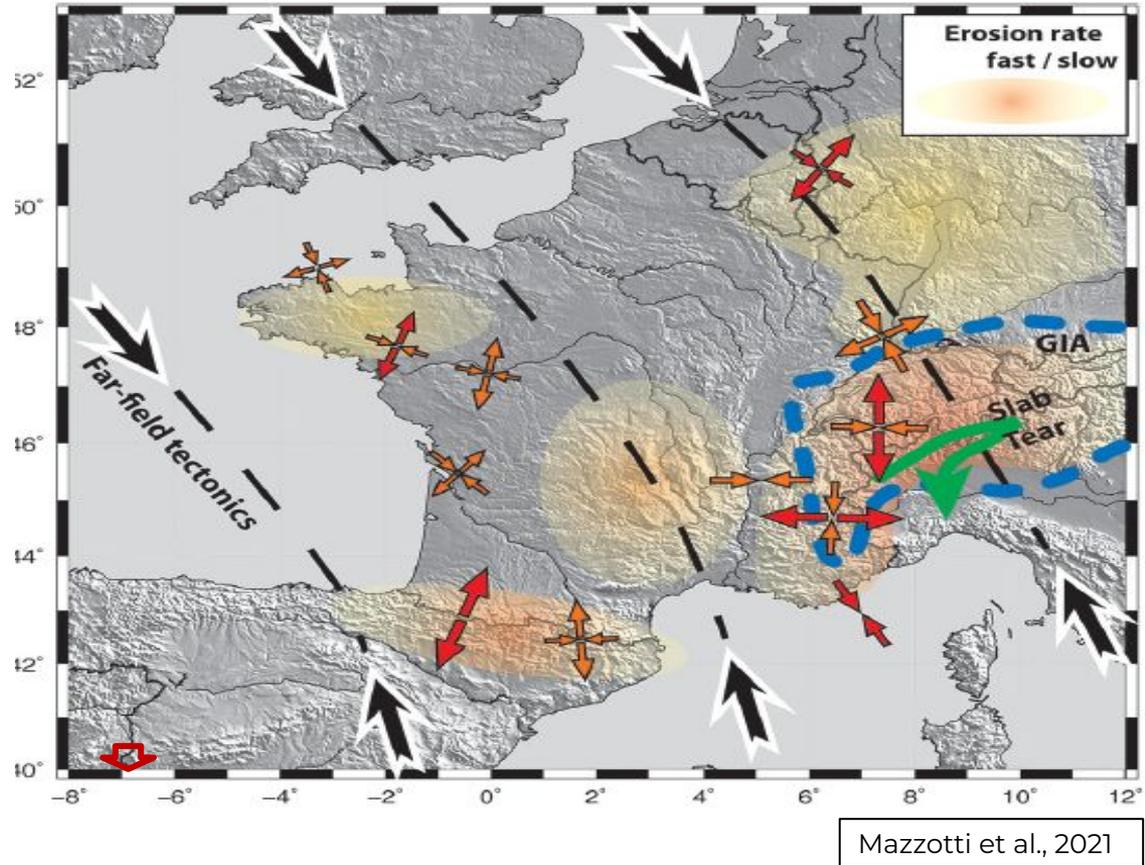


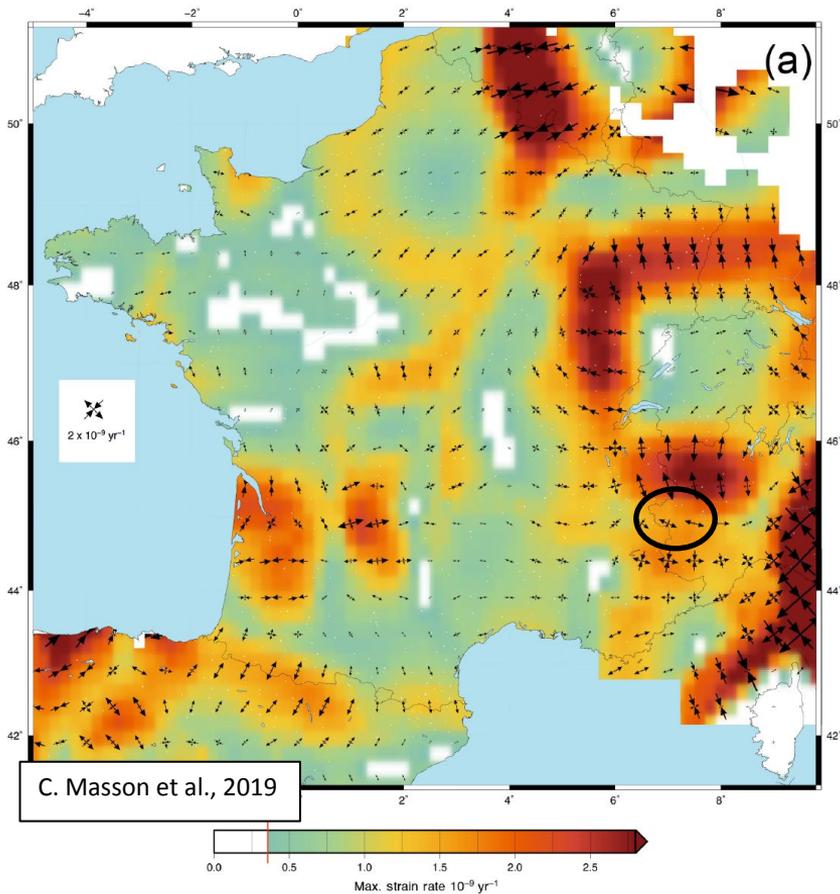
#OREME2024

Mouvement forts (accélération du sol)

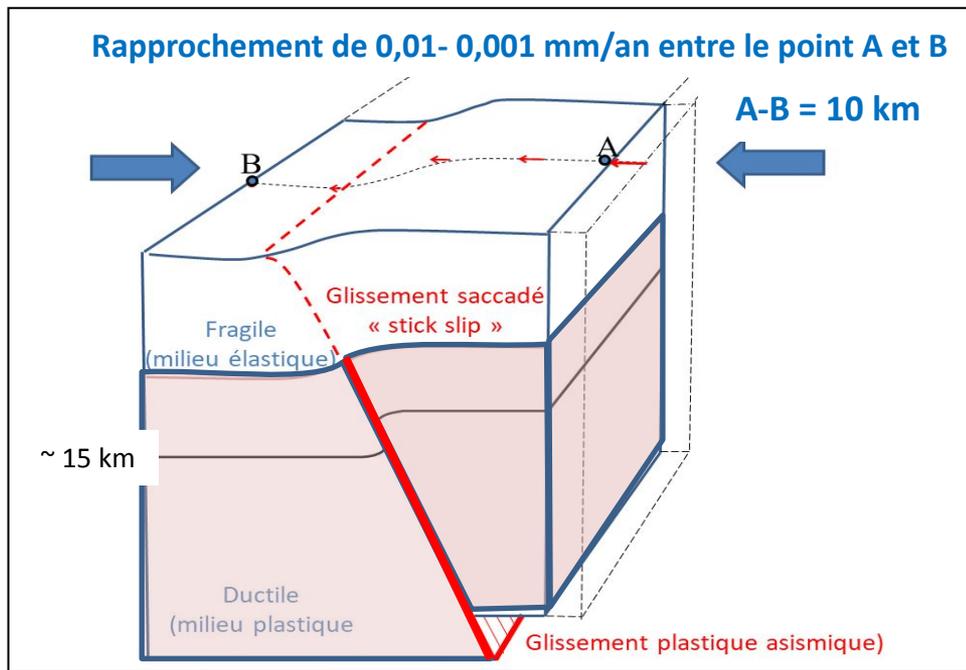


Les déformations en France semblent répondre à une combinaison de processus mêlant les effets distants de la **tectonique des plaques**, des **forces isostatiques locales**, et des différences de potentiel gravitationnel. Les taux de déformation sont **très faibles**.

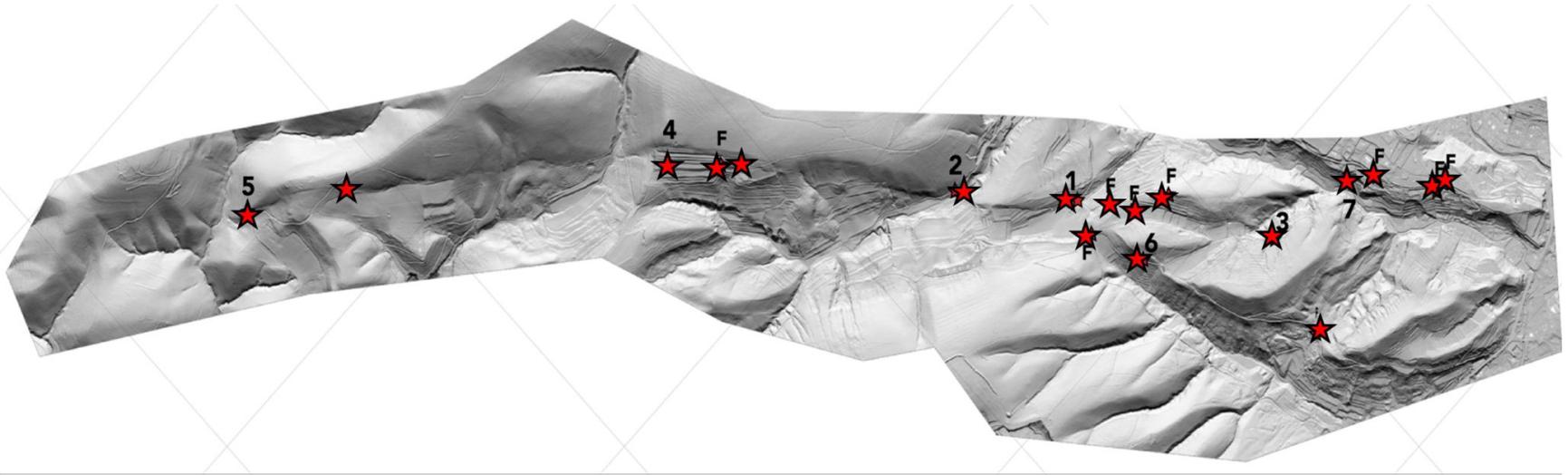




La France métropolitaine :
 région intraplaque
 à très faible taux de déformation :
10⁻⁹ / an - 10⁻¹⁰ / an

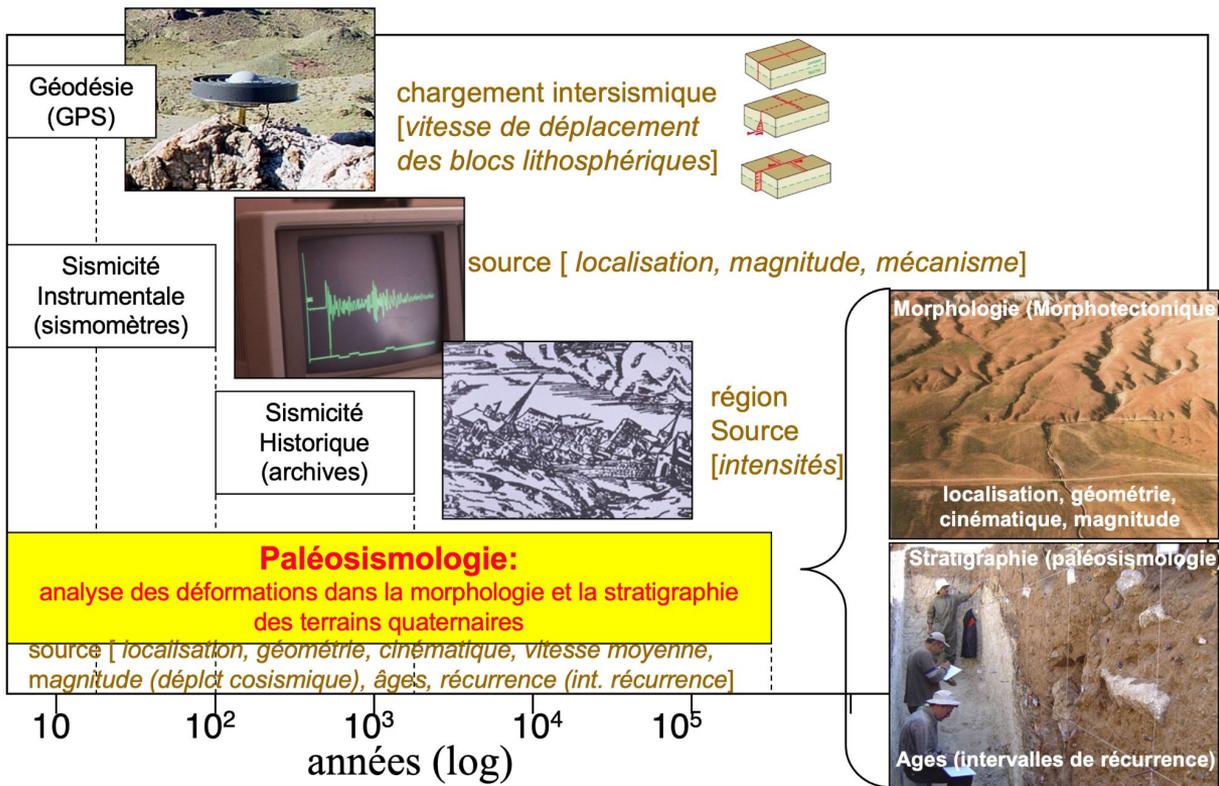


Indices de ruptures de surface le long de l'escarpement topographique associé à la **faille de la Rouvière** (fond cartographique Lidar resolution 25 cm)



NB/ L'expression morphologique en **faille normale** (période Oligocène : ouverture du Golfe du Lyon il y a 25 Ma) domine encore très nettement la morphologie.

✔ L'étude des séismes – les différentes approches



✔ Fenêtre de temps suffisamment grande permettant la **détection**, la **mesure** et l'**analyse statistique** des séismes Rouvière (système de failles des Cévennes).

✓ Indices paléosismologiques
(Cf e.g. MC Calpin 1996)

1) Terminaisons de failles

2) Drapage non-déformé recouvrant un escarpement de faille

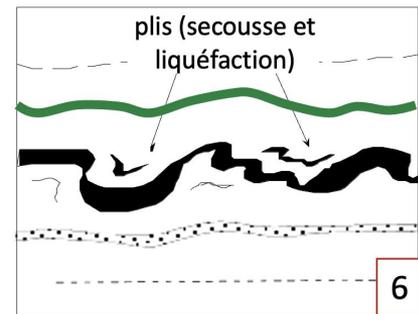
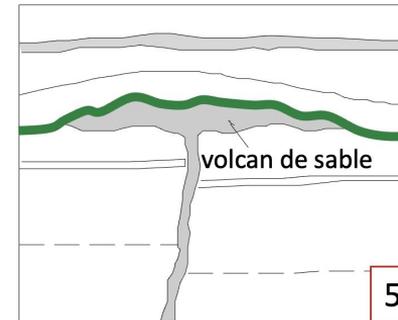
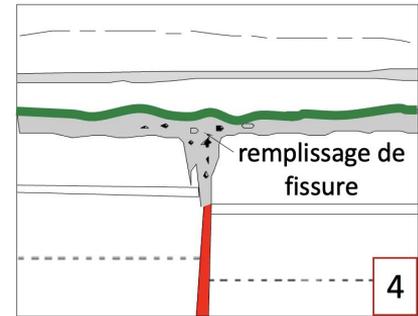
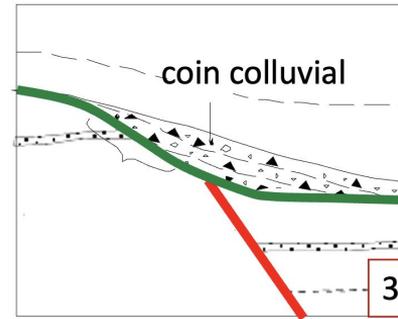
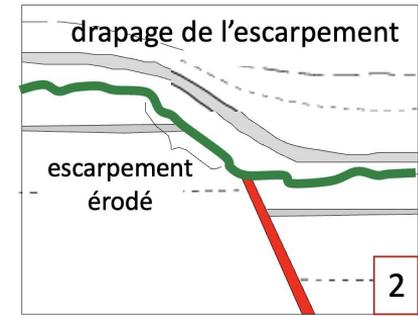
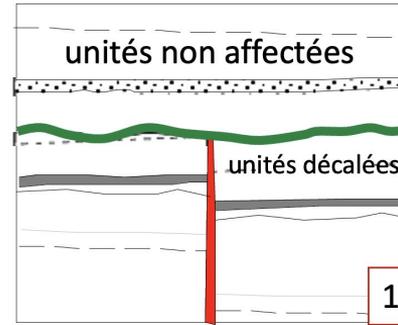
3) Coin colluvial

4) Fissure ouverte

5) Injection de sables, boues

6) Figures de liquéfaction

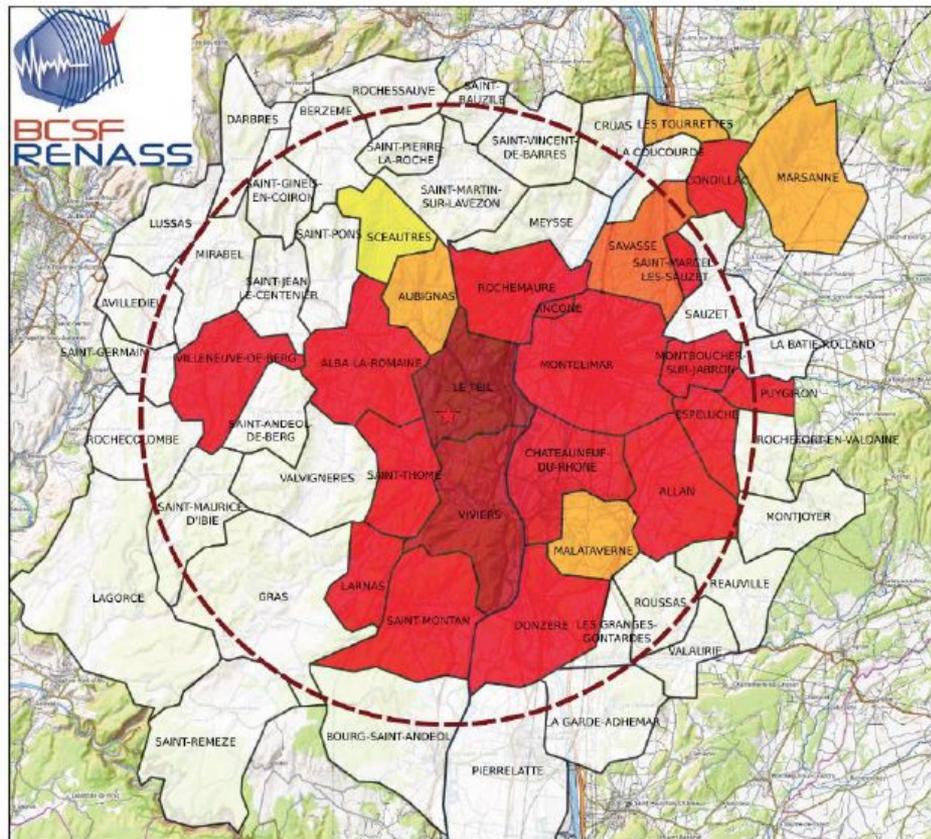
 « horizon événement »
= surface du sol au moment du paléoséisme



Carte des intensités EMS98

estimées par le Groupe d'Intervention Macrosismique (GIM).

Enquête de terrain réalisée entre 18 et le 22 novembre 2019



Background: Open Street Map

Cartography: Elise Beck, Pacte-Grenoble

Le Teil earthquake of 2019-11-11

Results at 2019-12-03

- 16 km from epicentre
- Epicentre
- Department borders
- Intensity
 - IV
 - V
 - V and VI
 - VI
 - VI and VII
 - VII
 - VII and VIII
 - Not estimated by the GIM (≤ 16 km)

RESIFORAP
IRSN Cerema
Pacte
Laboratoire de sciences sociales

0 5 10 15 km



#OREME2024

Journée scientifique de l'OREME 2024

Interlude technique :

Développement d'un strainmeter – X-strain



Martin Foin

Doctorant 3^{ème} année, UM/CNRS

Géosciences Montpellier



@Martin-Foin



#OREME2024

✔ Pourquoi mesurer la déformation

?



Hydrogéologie



Suivi
volcanologique



Génie civil
et industriel



Sismotectonique

✔ Comment mesurer la déformation?

Phénomènes rapides
Faibles amplitudes

Phénomènes rapides
Grandes amplitudes

Sismomètres



© ac de Lyon

Amplitude

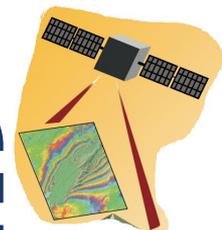
INSAR

???

GNSS



© earthscope



© earthscope

Faibles amplitudes
Phénomènes lents

Grandes amplitudes
Phénomènes lents

Durée

✔ Comment mesurer la déformation?

Phénomènes rapides
Faibles amplitudes

Phénomènes rapides
Grandes amplitudes

Sismomètres



© ac de Lyon

Amplitude

Strainmeter

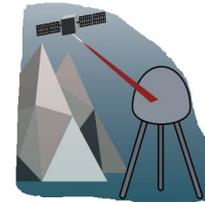


© earthscope

Faibles amplitudes
Phénomènes lents

Durée

GNSS



© earthscope

INSAR

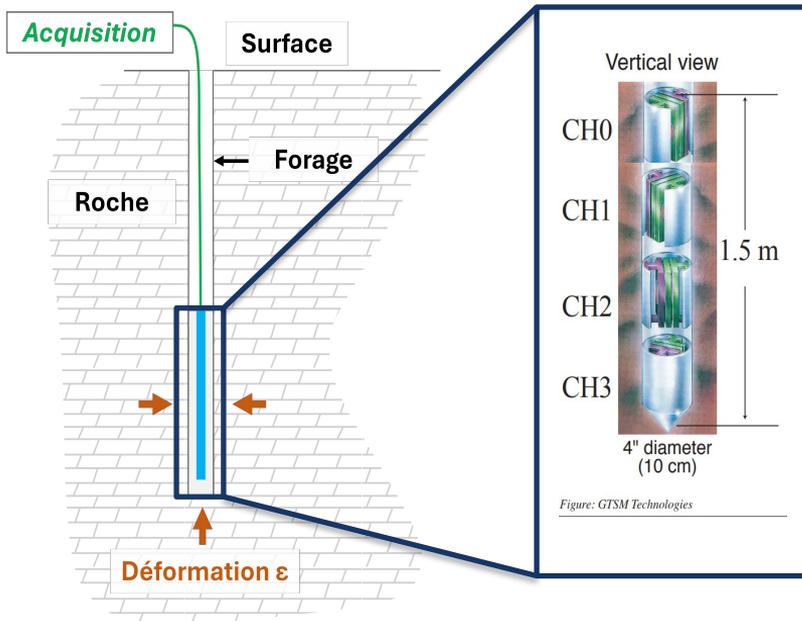


© earthscope

Grandes amplitudes
Phénomènes lents

Les strainmeter ou extensomètres

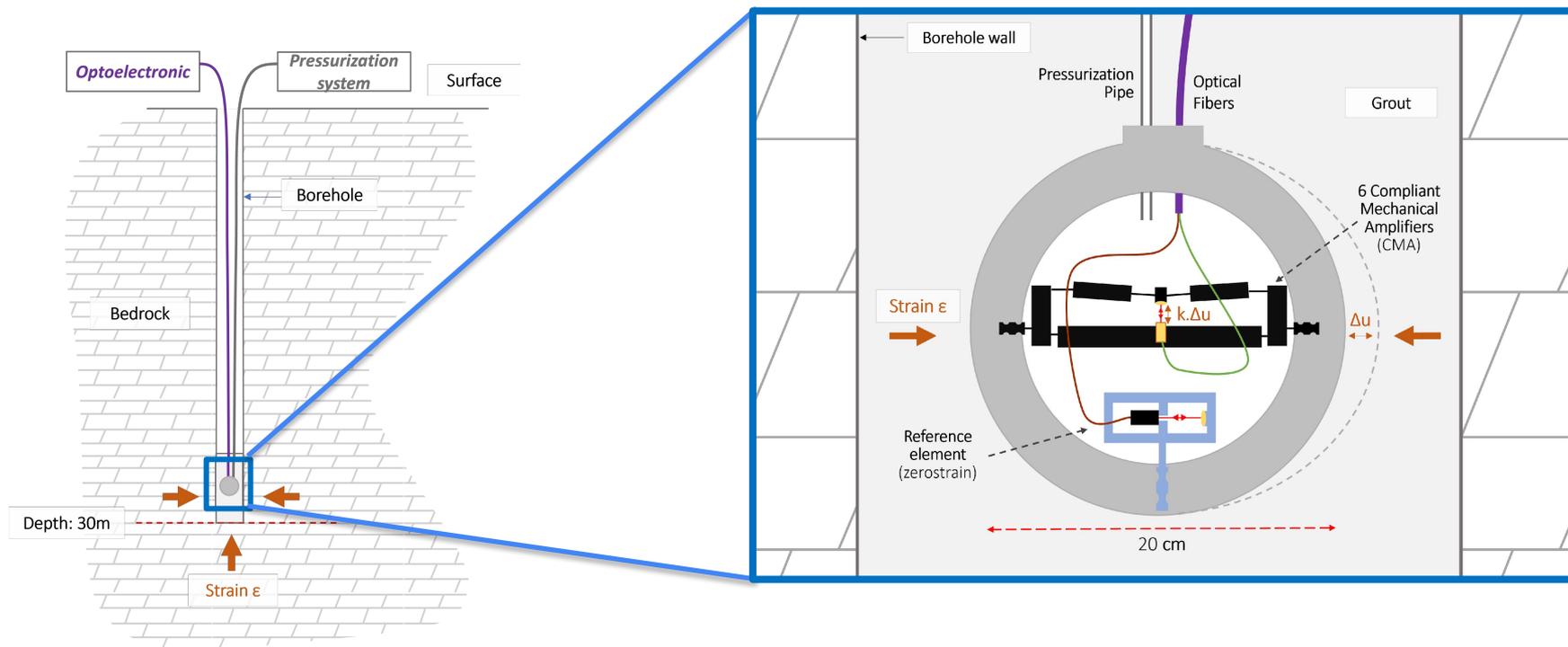
Mesurer la déformation au sein d'un forage transmise par la roche dans laquelle il est scellé



- Très haute résolution 10^{-10} strain
- Période [minute ; 2-3 mois]
- Une mesure horizontale de la déformation
- Coût de l'instrument [60-300] k€
- Difficulté de calibration de l'instrument au sein du forage
- Sensibilité aux phénomènes perturbateurs (foudre, épisodes pluvieux, température)



Prototype du nouveau strainmeter CNRS 13039-01



- Mesure complète (3D) de la déformation
- Mesure optique (interférométrie)
- Système de calibration *in-situ*
- Un système à coût modéré ~ 31 k€

Intégration et installation du prototype



Objectifs :

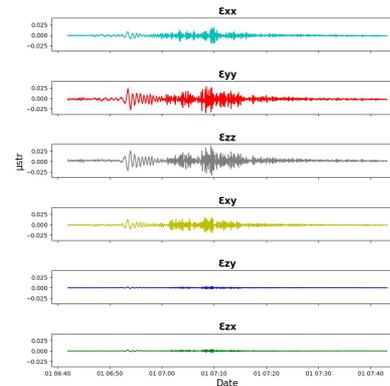
- Compréhension du comportement du capteur
- Déformation liée à l'hydrologie du karst

Perspectives :

- Analyse de la déformation volcanique
- Suivi de la déformation sismique
- Utilisation en génie civile



Installation du prototype (14/11/2024)
sur le site multi-instrumenté de
l'Observatoire du Larzac (OREME)



Déformation
associée au
séisme de Noto
(Japon) 01/01/2024

Journée scientifique de l'OREME 2024

Regards Croisés sur le Grand Rift Africain



Christel TIBERI

Directrice de recherche, CNRS
Géosciences Montpellier



@Christel Tiberi



Tony Rey

Prof. des Universités,
Univ. Paul Valéry, LAGAM

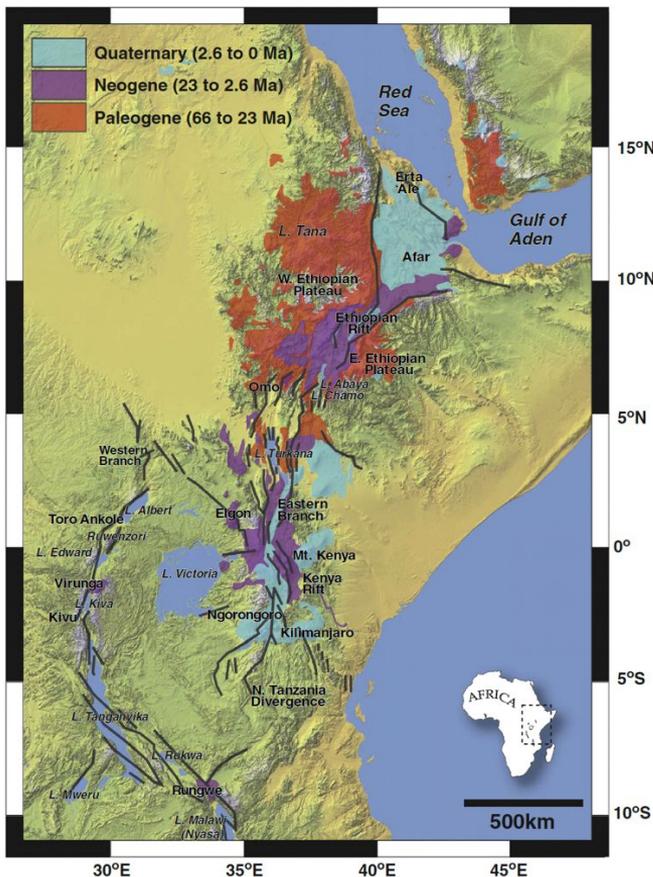


@Prof. Tony Rey



#OREME2024

✔ Qu'est-ce que le rift est africain ?



- Une structure de 4000 km de long
- Un relief très marqué [-157 +5895m]
- Volcanisme, sismicité

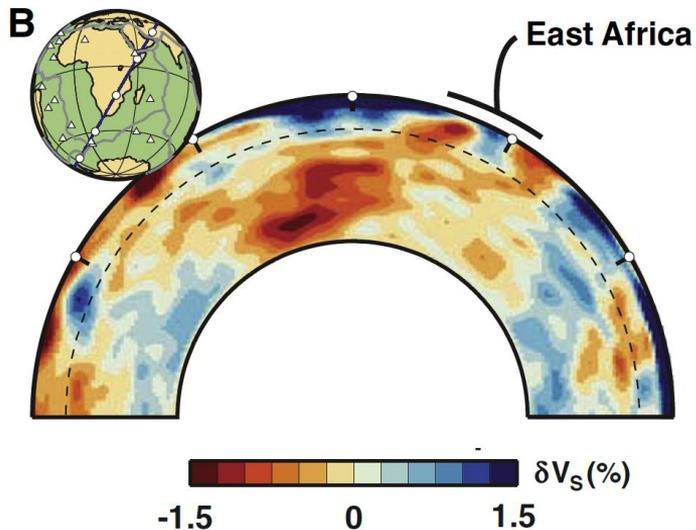
Héritage de la dynamique profonde de la Terre

Quelles conséquences ?

- Naissance d'un océan
- Aléas naturels, risques
- Répartitions des ressources
- Barrière climatique
- Migrations des populations

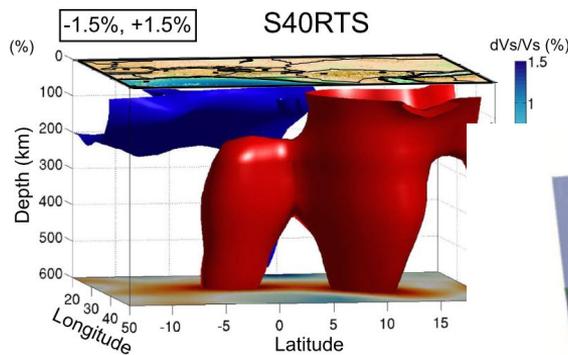


✓ Racines profondes

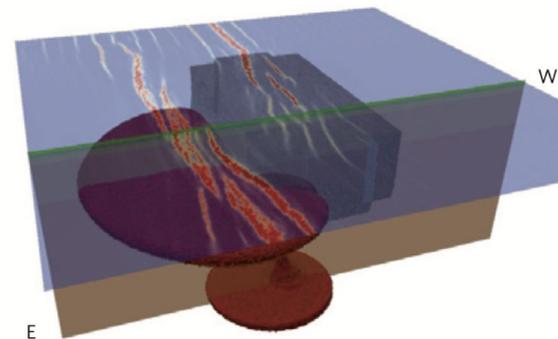


Ritsema et al., 2011

- Influence d'un (?) panache profond
- Données parcellaires et modèles variés
- Interactions surface profond



Chang et al., 2020

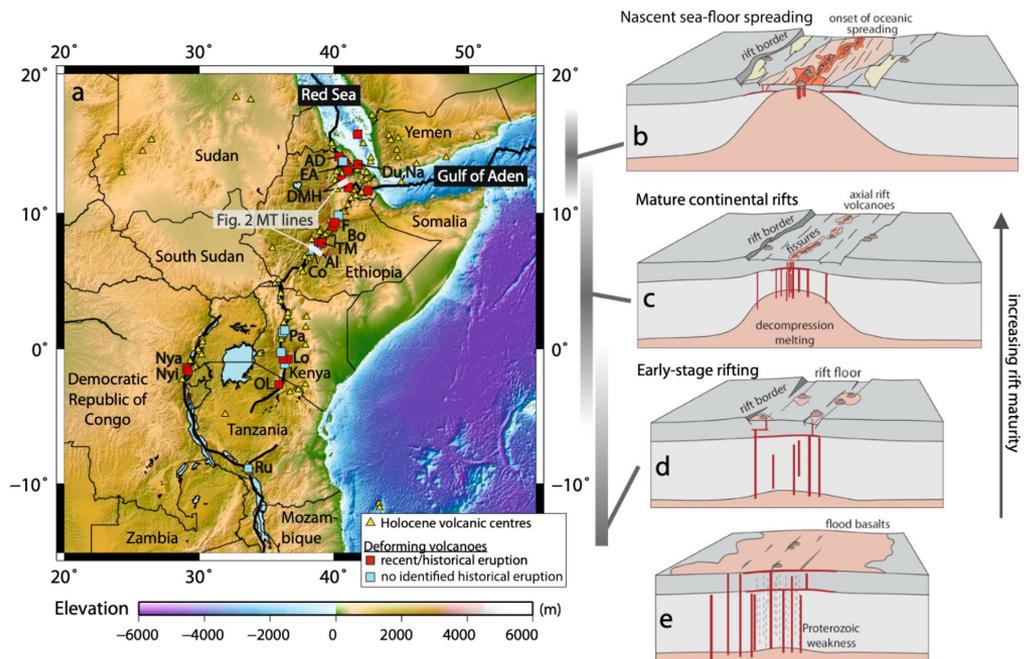


10 Myr

Koptev et al., 2018

✔ Naissance d'un océan

Possibilité unique d'étudier la rupture continentale sous différents contextes



✓ Quels enjeux ?

- ✓ **Académiques** : rupture continentale, rôle du CO₂, interactions topographie - climat, évolution humaine, histoire des civilisations, environnements extrêmes...
- ✓ **Sociétaux** : gestion des ressources (minérales, eau, parcs), du patrimoine, des risques (inondations, séismes, volcanisme, glissements de terrain), politique, environnement...

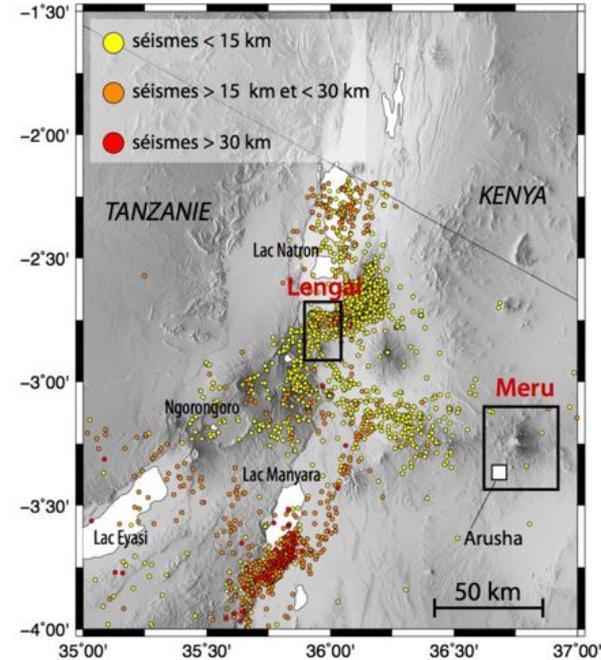


✔ Comment aborder un objet aussi complexe ?

- ✔ **Multi-facteurs** : enjeux multiples dépendant de facteurs interagissant entre eux, multi-échelles (temps et espace)
- ✔ **Interdisciplinarité** : aborder une problématique donnée en croisant nos regards et combinant nos savoir-faire.
- ✔ **Difficultés** : méthodologiques, temporelles, vocabulaires, rencontres, reconnaissance...



Interdisciplinarité en Tanzanie



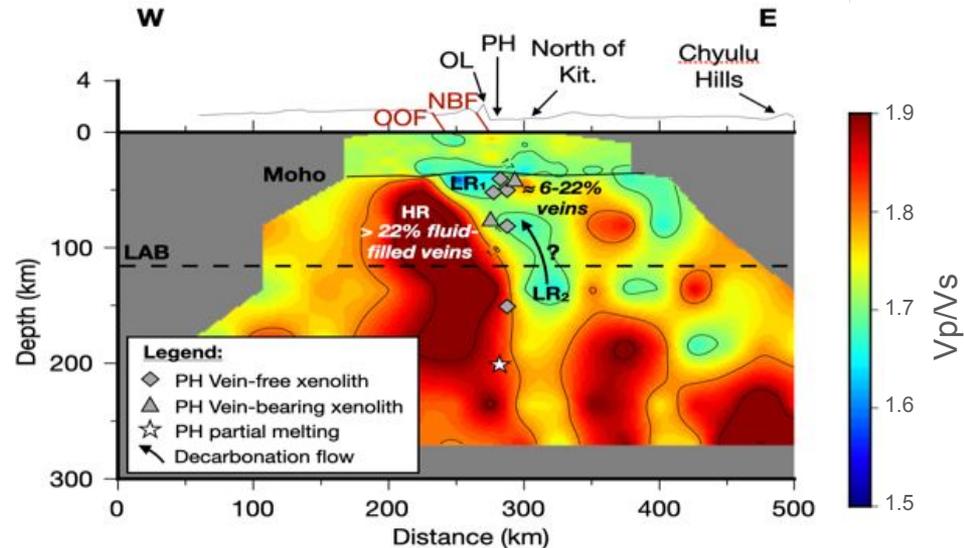
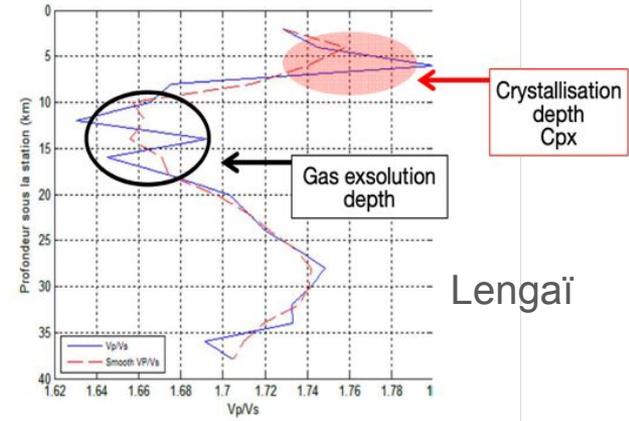
- Développement économique
- Sismicité/volcanisme contrastés
- Socio-écosystème variés

- géosciences
- didactique
- géographie
- écologie

Impacts de la géodynamique sur socio-écosystème ?

Comprendre les processus géologiques pour caractériser les aléas

- Localisation de la sismicité
 - Dynamique éruptive
 - Interactions entre processus
-
- Combiner géophysique, géochimie, pétrophysique
 - Différentes échelles spatio-temporelles



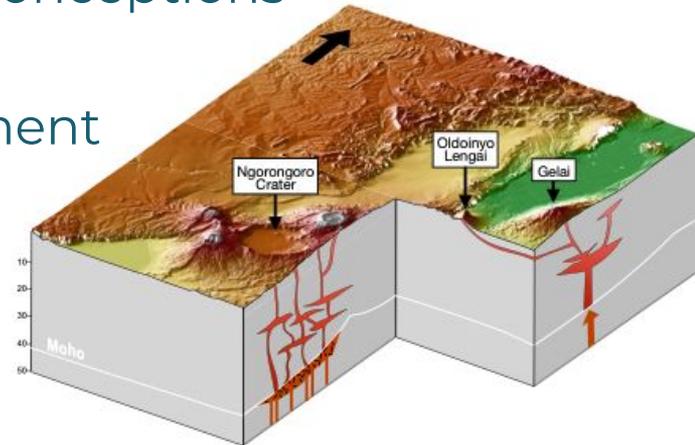


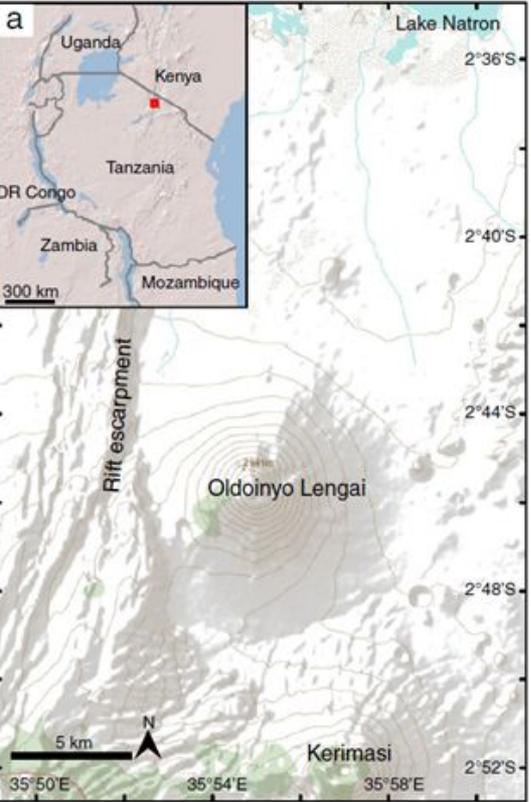
✔ Dynamique de la déformation

- héritage structural important
- lithosphère contrastée
- signature magmatique encore visible
- distribution hétérogène des risques

✔ Impact sur les populations

- vécus différents / conceptions contextualisées
- vécus < enseignement





✔ Vivre avec le volcan : un équilibre fragile en Tanzanie

- 65000 personnes dans un rayon de 70 km
- Mode de vie traditionnel
- Activités agro-pastorales (Massaïs et Bantous)
- Tourisme en croissance
- Dernière éruption du ODL : 2007-2008





© C. Gaucherel

© T. Rey

Des bienfaits

Un volcan mystique

 Bienfaits spirituels

Des plaines fertiles

 Agriculture, pâturages

Le lac hypersalé du Natron

 Exploitation du sel

Paysage, culture et nature sauvage

 Le géotourisme



#OREME2024



© T. Rey



Dépôts de cendres de l'éruption de 2008

✔ mais des menaces volcaniques

- retombées de cendres
- gaz
- coulées de lave
- coulées de boue
- mouvements de terrain

Déplacements de population,
Risques pour la santé,
Dangers pour les infrastructures
Conséquences socio-économiques

insuffisamment connues



Évaluer ces menaces pour réduire les risques de catastrophes

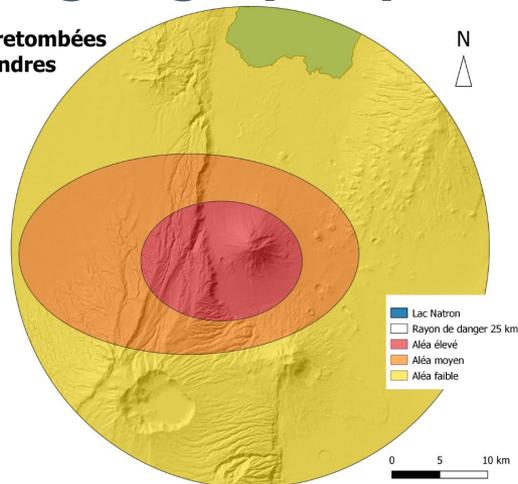


#OREME2024

Croisement des approches géographiques et cartographiques



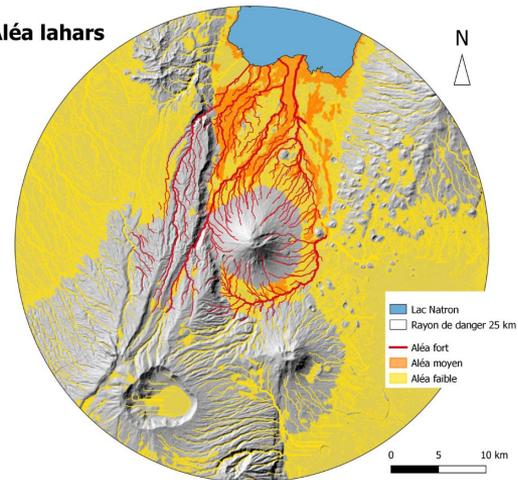
Aléa retombées de cendres



→ Utilisation du modèle Tephra 2 pour spatialiser la dispersion des cendres (données terrain + modèle)



Aléa lahars



→ croisement du réseau hydrographique et des retombées de cendres pour identifier les axes les plus laharigènes

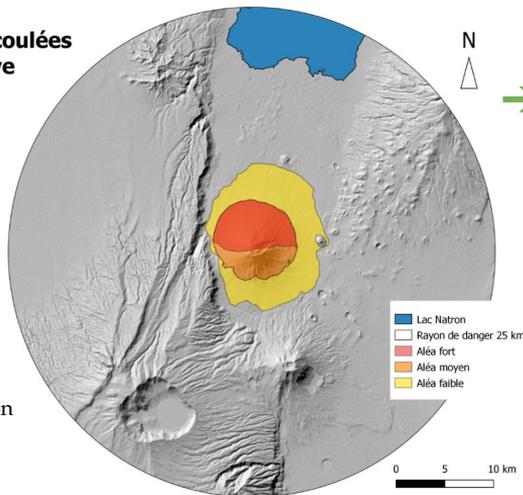
Croisement des approches géographiques et cartographiques



© T. Rey & S. Defosse

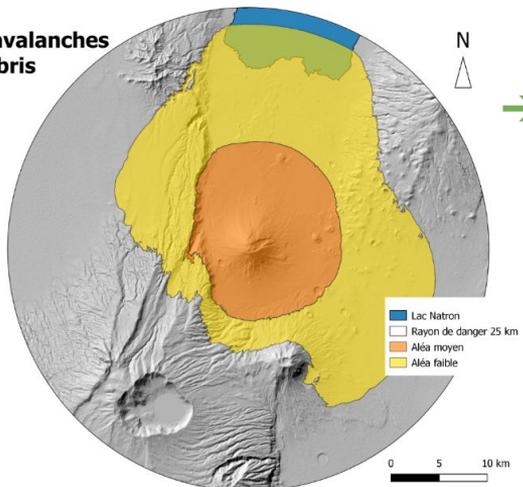
Aléa coulées de lave

Conception
LAGAM



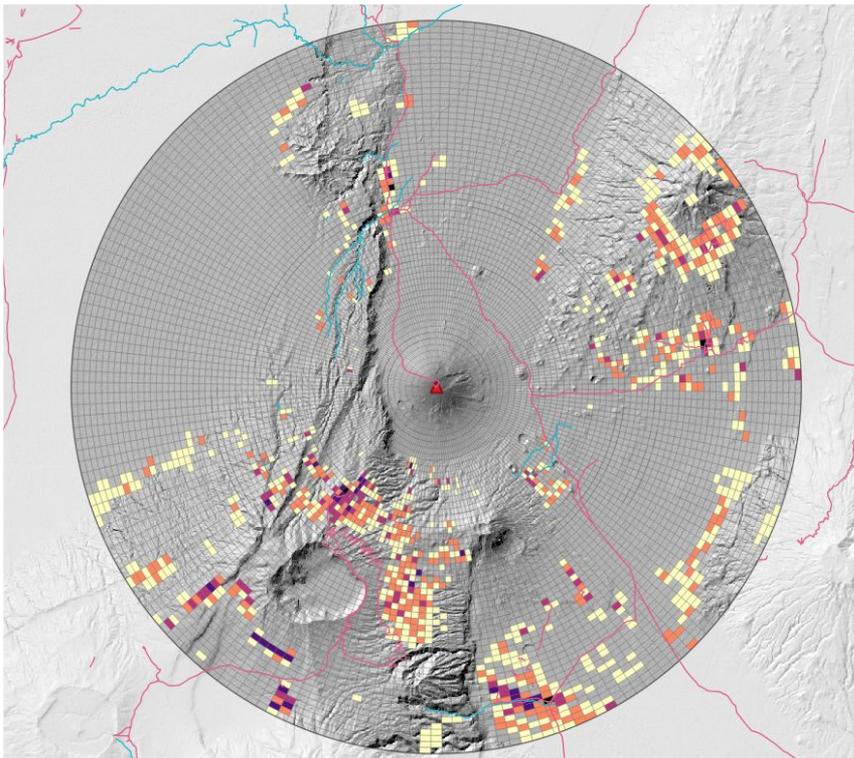
→ Analyse géohistorique des occurrences de coulées en lien avec les points de fragilités sur le cratère

Aléa avalanches de débris



→ Analyse des ADD en utilisant les lignes d'énergie de 3 anciennes ADD connues (calcul des angles d'énergie)

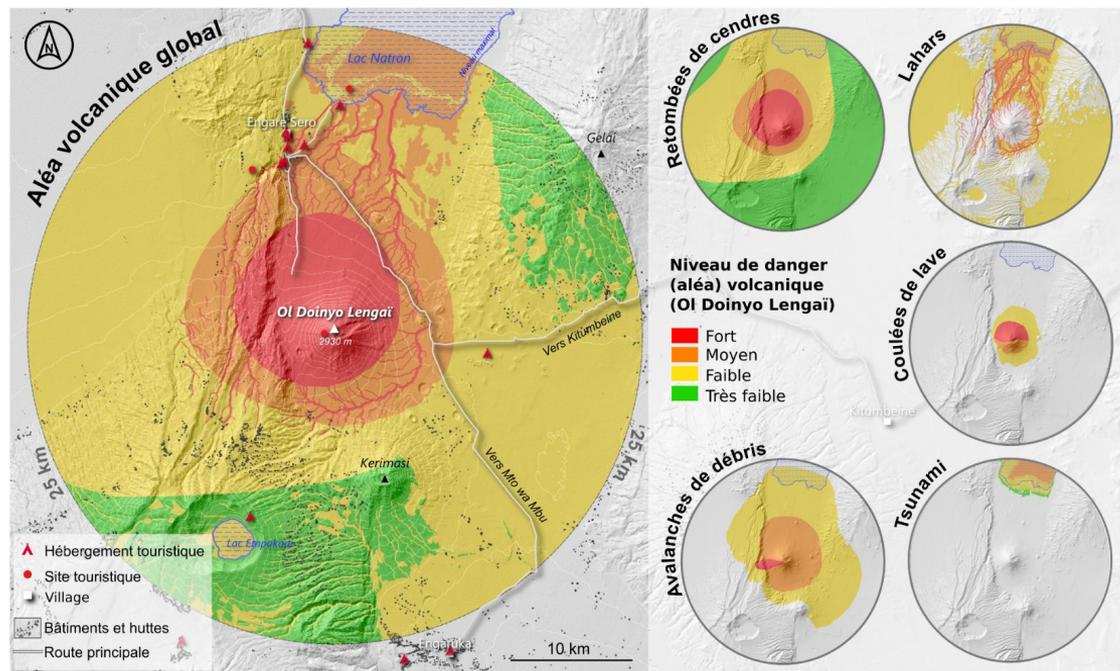
✔ Des enjeux aux vulnérabilités différentielles



- Enjeux humains
- Enjeux matériels
- Enjeux fonctionnels (routes)
- Enjeux socio-économiques



✔ Territoire exposé, territoire en danger





✔ Une culture du risque volcanique en danger

Tradition vs modernité

Propriété foncière commune

Accaparement des terres maasai



#OREME2024



✔ Conclusion - Le Rift, un objet pluriel

Comprendre son environnement

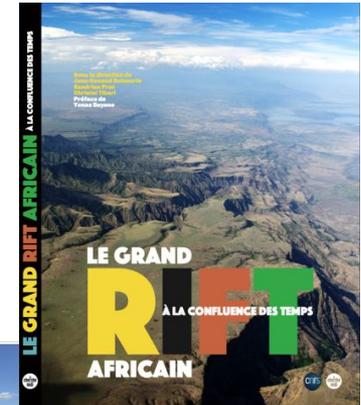
- pour mieux le gérer
- pour mieux s'y intégrer
- nécessite des allers-retours entre disciplines

Gestion de l'environnement

- à quelle échelle de temps ?
- pour qui ?

Interdisciplinarité

- apports et mise en valeur



OREME

Introduction table ronde

Ressources minérales et transition écologique : réconcilier énergie et environnement



Bénédicte CENKI

Maîtresse de Conférences UM
Géosciences Montpellier

 @cenki_benedicte

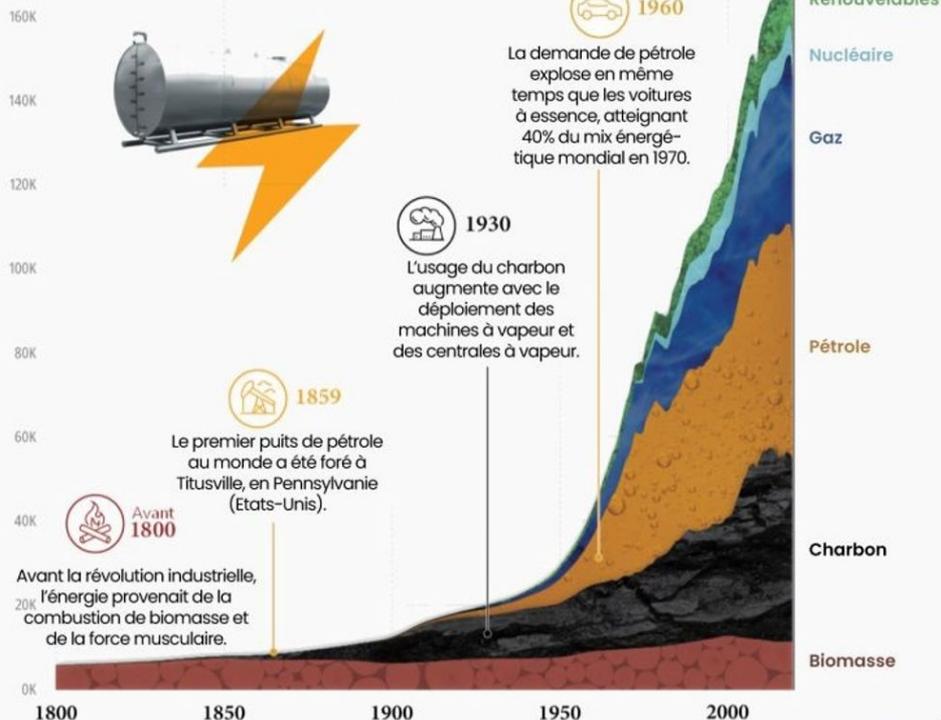


#OREME2024

L'évolution du mix énergétique mondial depuis 1800

Consommation d'énergie primaire par source, 1800-2020

180K Terrawattheures (TWh)



Source: Vaclav Smil (2017), BP Statistical Review of World Energy via Our World in Data

✔ D'une économie brune à une économie 'verte'

Brown Economy

Fossil Fuels for combustion engines, generators and power stations: oil, gas, coal

Energy Transition

Green Economy

Functional Materials in e-motors, energy storage, energy conversion containing, for example, Co, Li, Pt, REE, Ge, Ga, Si, V



Fundamental shift in the resource basis of a society

1

Sortie du charbon
au 1er janvier 2027

2

Déploiement de
l'éolien en mer

3

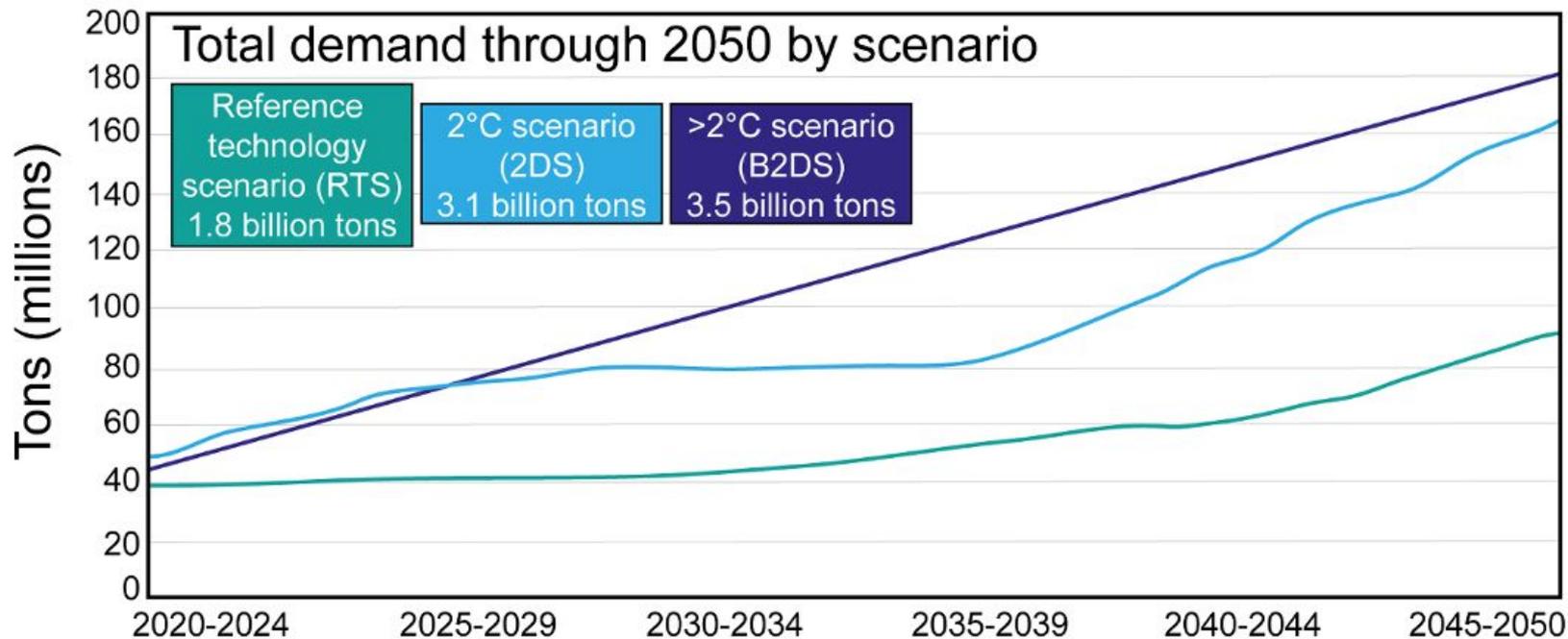
Grand inventaire
des ressources minières

4

Financement de 13 projets
de RER métropolitains

Emmanuel Macron
25 septembre 2023

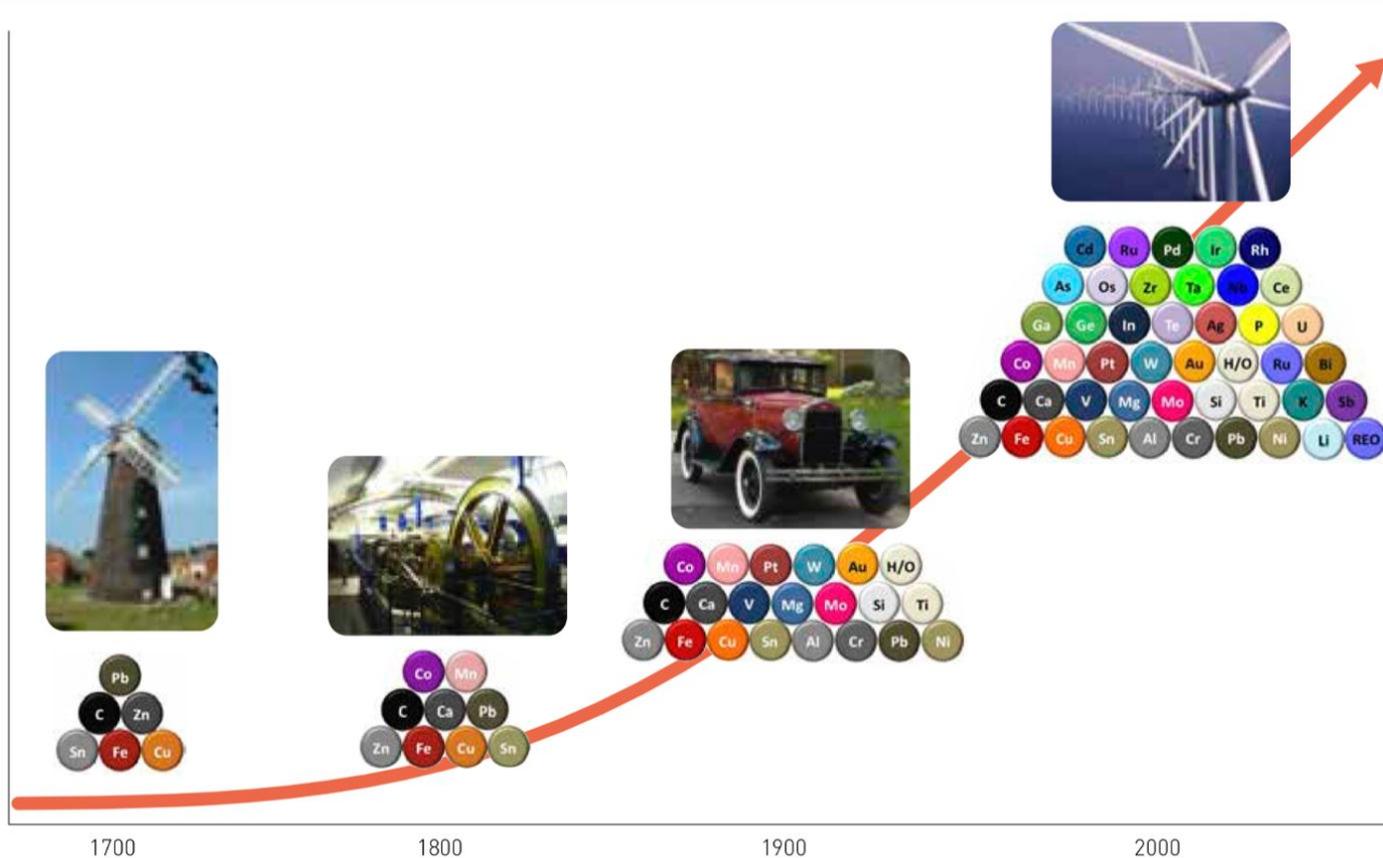
Projection annuelle de la demande en ressources minérales



Scénarios climatiques: B2DS (beyond 2-degree scenario), 2DS (2-degree scenario), RTS (reference technology scenario)

Hund et al., Climate Smart Mining, worldbank.org, 2020

Augmentation de la diversité des métaux utilisés par l'humanité



1 H Hydrogène	PRINCIPE																2 He Hélium
<p>Conçu en 1869 par le chimiste russe Dimitri Ivanovitch Mendeleïev, le tableau périodique classe tous les éléments chimiques selon leur numéro atomique et leurs propriétés chimiques. Quatre éléments ont été identifiés entre 2004 et 2010 et viennent d'être validés par l'Union internationale de chimie pure et appliquée (IUPAC).</p>																	
3 Li Lithium	4 Be Béryllium											5 B Bore	6 C Carbone	7 N Azote	8 O Oxygène	9 F Fluor	10 Ne Néon
11 Na Sodium	12 Mg Magnésium											13 Al Aluminium	14 Si Silicium	15 P Phosphore	16 S Soufre	17 Cl Chlore	18 Ar Argon
19 K Potassium	20 Ca Calcium	21 Sc Scandium	22 Ti Titane	23 V Vanadium	24 Cr Chrome	25 Mn Manganèse	26 Fe Fer	27 Co Cobalt	28 Ni Nickel	29 Cu Cuivre	30 Zn Zinc	31 Ga Gallium	32 Ge Germanium	33 As Arsenic	34 Se Sélénium	35 Br Brome	36 Kr Krypton
37 Rb Rubidium	38 Sr Strontium	39 Y Yttrium	40 Zr Zirconium	41 Nb Niobium	42 Mo Molybdène	43 Tc Technétium	44 Ru Ruthénium	45 Rh Rhodium	46 Pd Palladium	47 Ag Argent	48 Cd Cadmium	49 In Indium	50 Sn Étain	51 Sb Antimoine	52 Te Tellure	53 I Iode	54 Xe Xénon
55 Cs Césium	56 Ba Baryum	57-71 La-Lu Lanthanides	72 Hf Hafnium	73 Ta Tantale	74 W Tungstène	75 Re Rhénium	76 Os Osmium	77 Ir Iridium	78 Pt Platine	79 Au Or	80 Hg Mercure	81 Tl Thallium	82 Pb Plomb	83 Bi Bismuth	84 Po Polonium	85 At Astaté	86 Rn Radon
87 Fr Francium	88 Ra Radium	89-103 Ac-Lr Actinides	104 Rf Rutherfordium	105 Db Dubnium	106 Sg Seaborgium	107 Bh Bohrium	108 Hs Hassium	109 Mt Meitnerium	110 Ds Darmstadtium	111 Rg Roentgenium	112 Cn Copernicium	113 * Nh Nihonium	114 Fl Flerovium	115 * Mc Moscovium	116 Lv Livermorium	117 * Ts Tennessine	118 * Og Oganesson

- Éléments synthétiques créés artificiellement dans des accélérateurs de particules ou lors de réactions nucléaires
- × Éléments n'ayant pas d'utilisation
- ★ Nouveaux éléments chimiques validés en 2016 par l'IUPAC

57 La Lanthane	58 Ce Cérium	59 Pr Praséodyme	60 Nd Néodyme	61 Pm Prométhium	62 Sm Samarium	63 Eu Europium	64 Gd Gadolinium	65 Tb Terbium	66 Dy Dysprosium	67 Ho Holmium	68 Er Erbium	69 Tm Thulium	70 Yb Ytterbium	71 Lu Lutetium
89 Ac Actinium	90 Th Thorium	91 Pa Protactinium	92 U Uranium	93 Np Neptunium	94 Pu Plutonium	95 Am Américium	96 Cm Curium	97 Bk Berkélium	98 Cf Californium	99 Es Einsteinium	100 Fm Fermium	101 Md Mendelevium	102 No Nobelium	103 Lr Lawrencium

Familles

Classement des éléments en fonction d'un comportement chimique proche.

- Non-métaux
- Métaux alcalins
- Métaux alcalino-terreux
- Métaux de transition
- Lanthanides (ou terres rares)
- Actinides
- Métaux pauvres
- Halogènes
- Gaz rares
- Métalloïdes

État physiques

Ne gaz Hg liquide Fe solide

SiO₂



✓ Roche, minéral, éléments ?

Roche: grès



Minéraux: quartz SiO_2

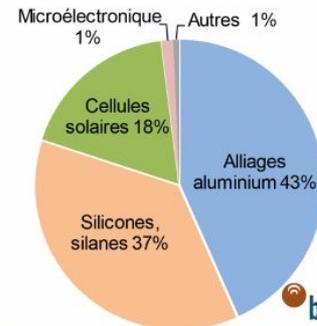


Éléments chimiques *Silicium métal (Si)*



Exemple de site d'exploitation des grès et de production de silice et silicium: Vallabrix (30)

Usages du silicium métal en 2019



Consommation mondiale 2019 : 3,0 Mt

Source : BRGM

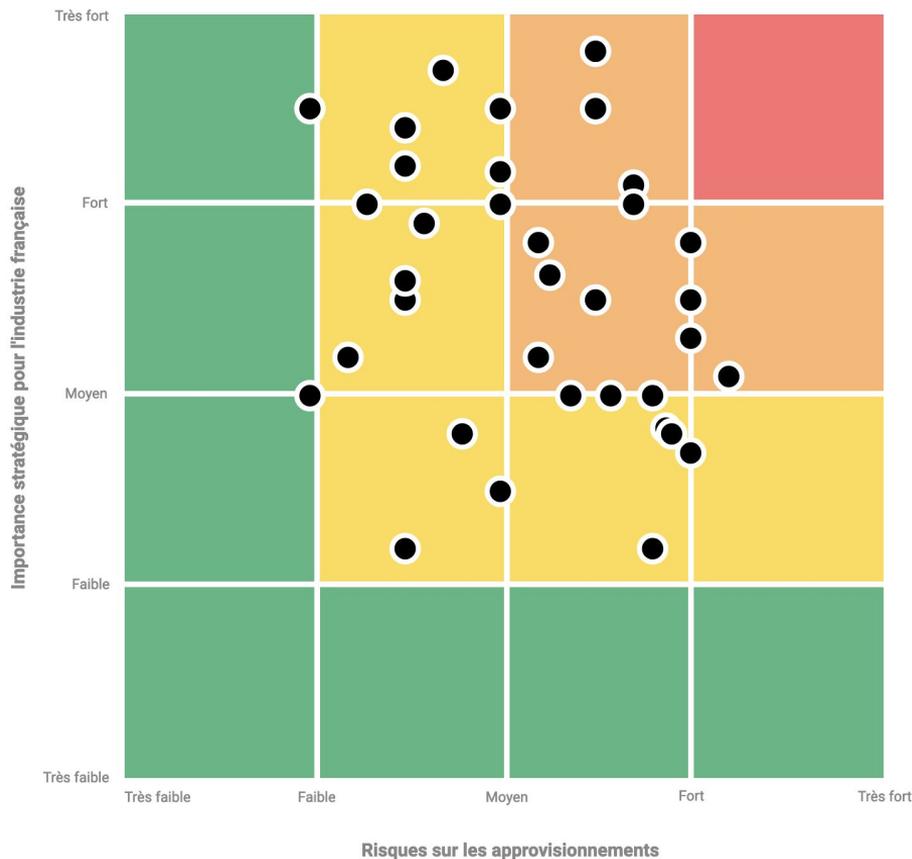
brgm
Décisions pour un terre durable



oreme.org



Criticité des métaux: importance économique et risque d'approvisionnement

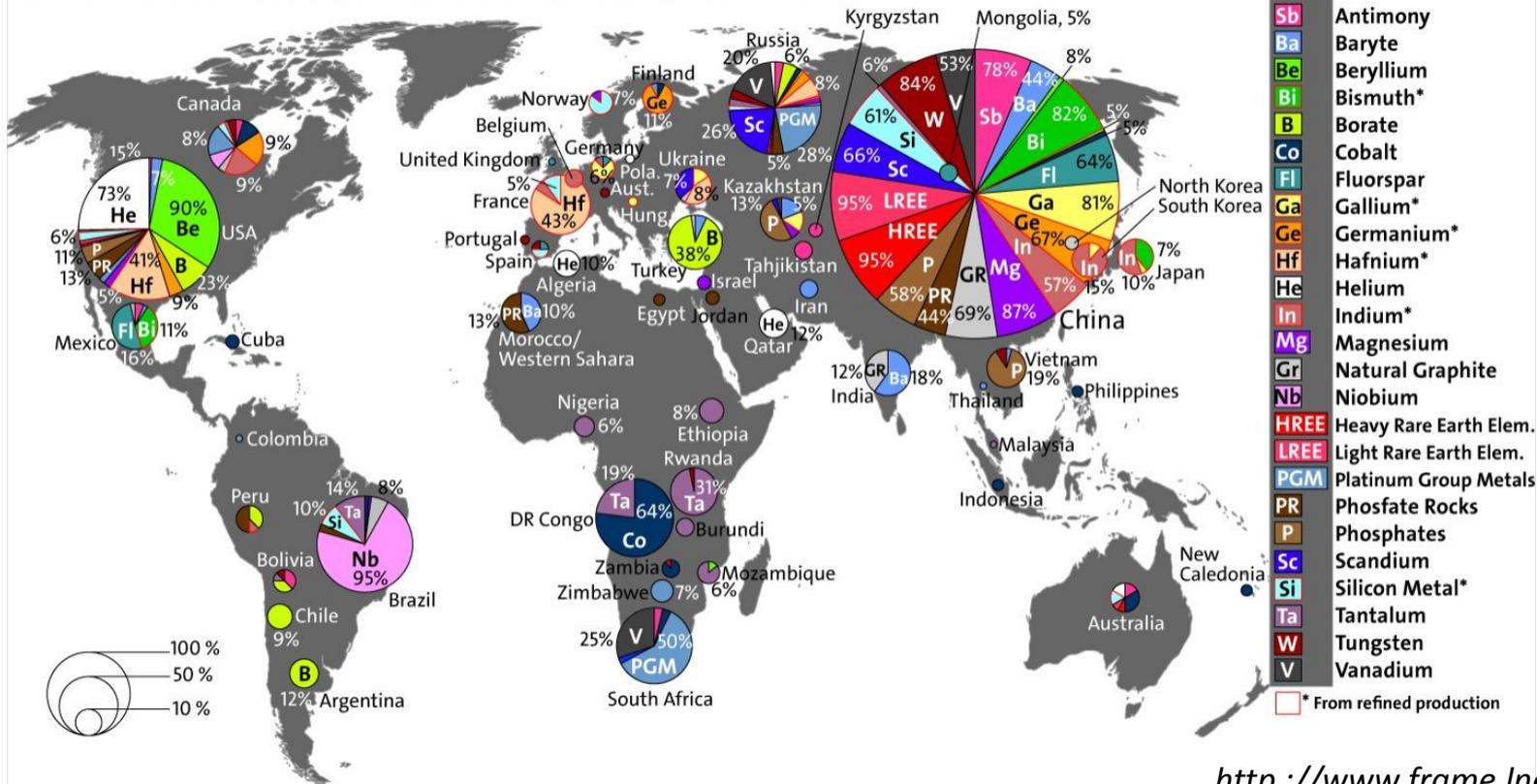


Origine des métaux critiques utilisés en Europe

Global Supply of EU Critical Minerals and Metals

The pie charts show the percent distribution of the production of critical metals and minerals. In total, it is 100% for each raw material. The area of the pies are proportional. SGU 2017.

Sources: USGS, European Commission, SGU



A photograph of a traditional windmill in a field at sunset. The windmill is on the left, with its large circular fan and three-bladed tail wheel. The sky is a gradient of blue and orange, and the foreground is a field of dry grass. In the distance, there are silhouettes of buildings and trees.

La transition énergétique va simplement remplacer une ressource non-renouvelable (énergie fossile) par une autre (métaux et minéraux).

Oliver Vidal et co-auteurs, Nature Geosciences, 2013

✓ L'importance de nos choix de sociétés



01

GÉNÉRATION FRUGALE

La transition est conduite principalement par la contrainte et par la sobriété.

[En savoir plus](#)



02

COOPÉRATIONS TERRITORIALES

La société se transforme dans le cadre d'une gouvernance partagée.

[En savoir plus](#)



03

TECHNOLOGIES VERTES

L'innovation est mise au service de systèmes énergétiques décarbonés.

[En savoir plus](#)



04

PARI RÉPARATEUR

La société place sa confiance dans la capacité à réparer, les systèmes sociaux et écologiques.

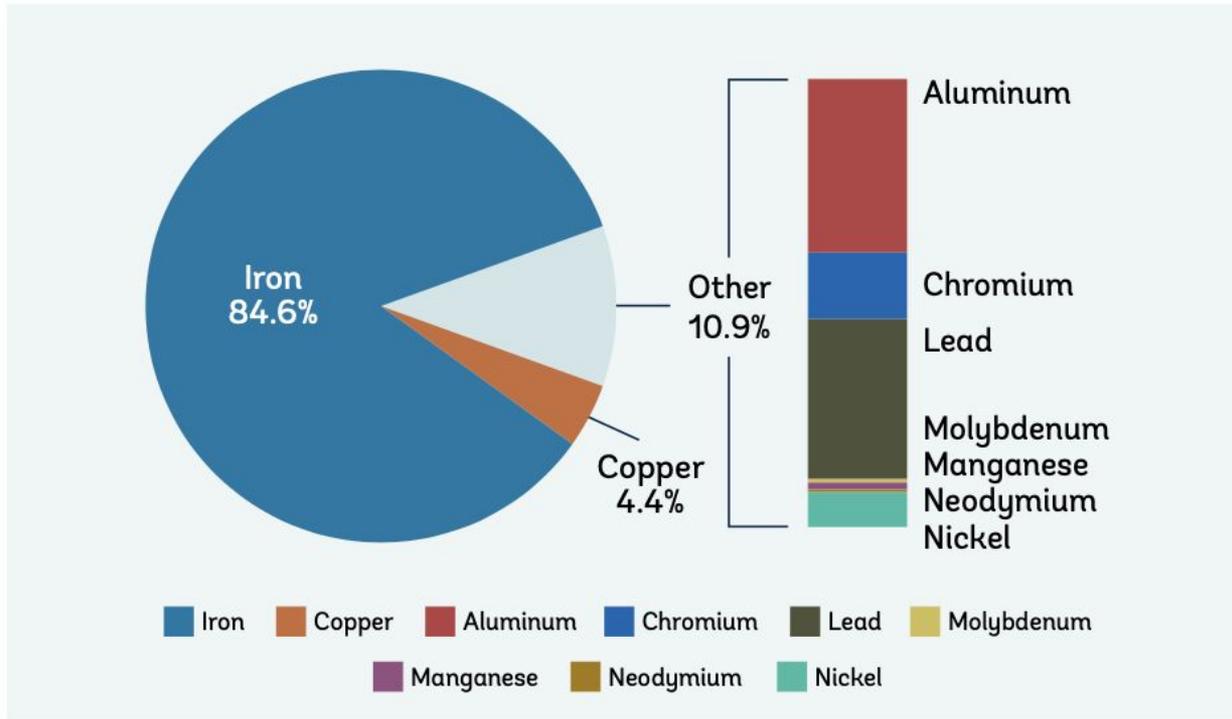
[En savoir plus](#)

✔ **Les énergies renouvelables, ‘vertes’ :
exemple de l'éolien**



Vidal et co-auteurs., Nat. Geosc. 2013

✔ La tension de l'éolien sur les métaux est spécifique



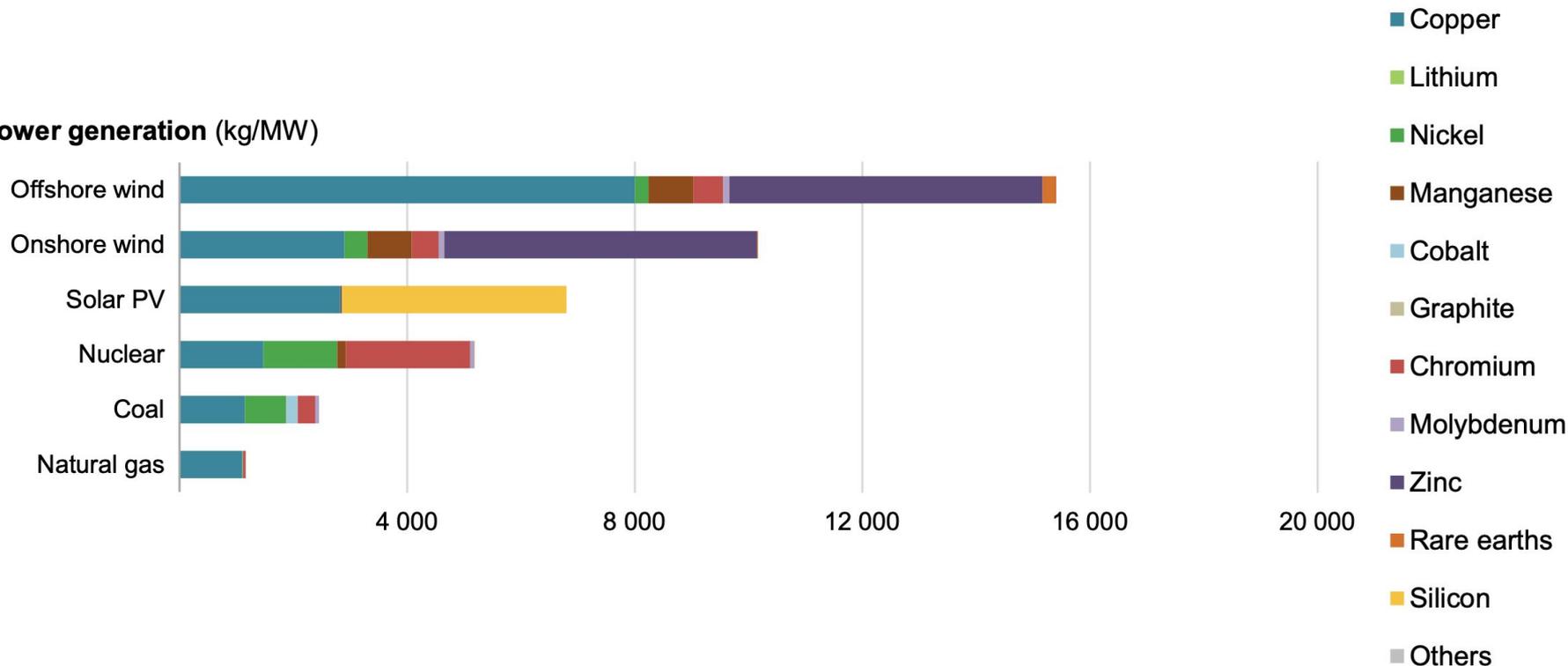
Note: 2DS = 2-degree scenario, IEA = International Energy Agency.

Source : *The Role of Critical World Energy. Outlook Special Report Minerals in Clean Energy Transitions, World Energy Outlook Special Report (IEA).*



La tension de l'éolien sur les métaux est spécifique

Power generation (kg/MW)



Source : *The Role of Critical World Energy. Outlook Special Report Minerals in Clean Energy Transitions, World Energy Outlook Special Report (IEA).*

✔ Focus sur les terres rares (Rare Earths en anglais)

- **Terres = oxydes**

Les éléments des TR sont des métaux, mais à l'état d'oxydes dans les minerais.

- **Rares:** Peu de gisements découverts en Europe alors que les minerais d'oxyde de terres rares sont relativement abondants dans le monde (< 0,005 % de l'écorce terrestre).

De plus ces éléments sont difficiles à séparer à cause de leurs propriétés chimiques voisines.



La demande en Terres Rares ne cesse d'augmenter depuis 2000

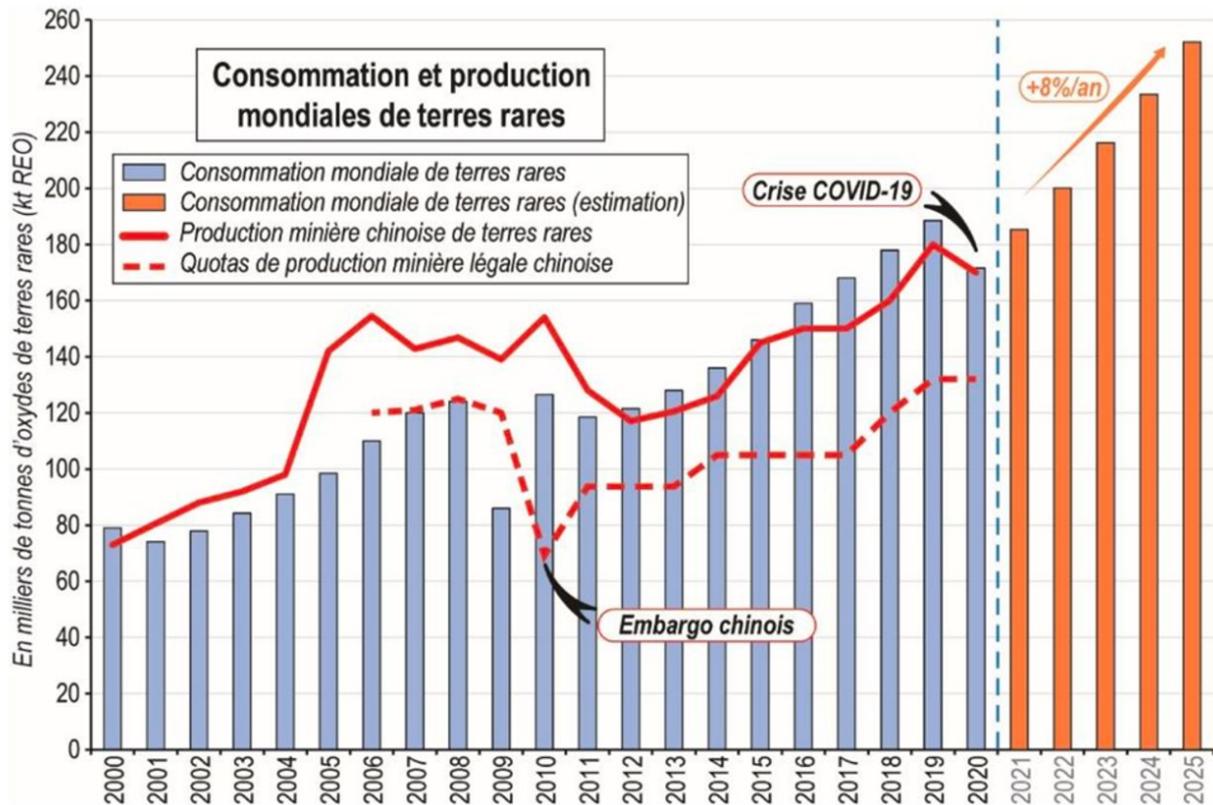


Figure 6 : Consommation et production mondiales de REE entre 2000 et 2020 et estimations entre 2021 et 2025 (d'après BRGM).

Un méga gisement de terres rares découvert à Kiruna, en Suède

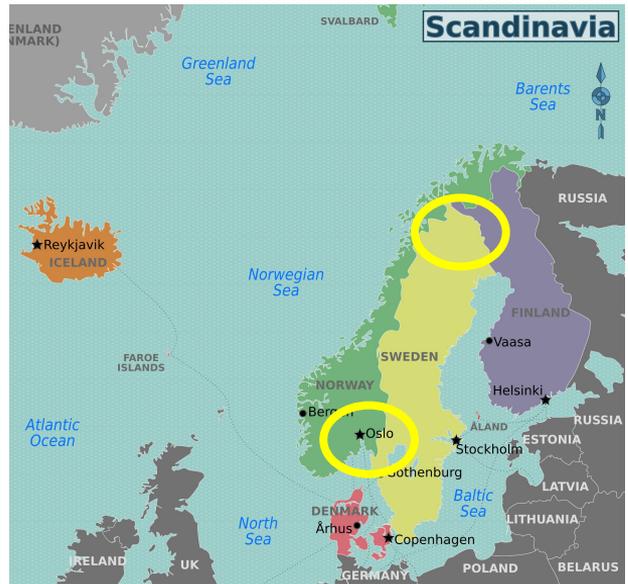
Selon le groupe minier LKAB, il s'agirait du plus grand gisement connu de terres rares en Europe. Une annonce qui intervient alors que le continent, conscient des problèmes causés par sa dépendance, s'active pour trouver d'autres solutions d'approvisionnement



Le PDG de LKAB Jan Moström et la ministre suédoise de l'Énergie Ebba Busch à Kiruna, 12 janvier 2022. — © TT

T Le Temps avec l'ATS

Publié le 12 janvier 2023 à 13:31. / Modifié le 12 janvier 2023 à 15:32.



SCIENCES ET ENVIRONNEMENT • NORVÈGE • MINÉRAIS

Ressources. Terres rares : une découverte spectaculaire en Norvège

La compagnie Rare Earths Norway annonce avoir identifié dans le sud-est de la Norvège un gisement de terres rares estimé à près de 10 millions de tonnes de ces métaux indispensables à la transition écologique. L'exploitation du site pourrait débuter d'ici à 2030, rapporte la chaîne "NRK".



SOURCE :
Courrier international



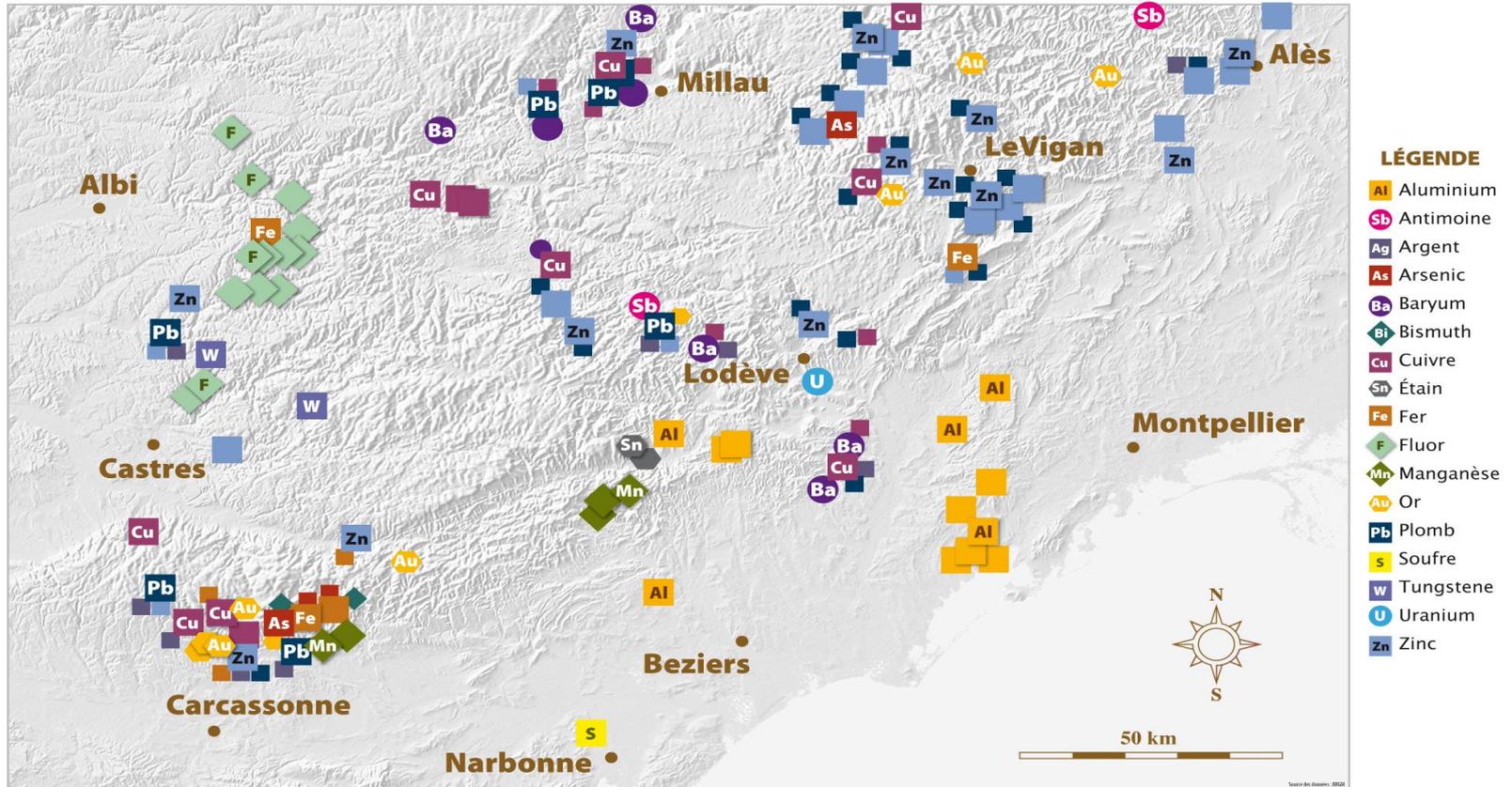
Lecture 1 min. 🗓️ Publié le 7 juin 2024 à 17h31

Ressources minérales relocalisées : exemple de l'Occitanie.

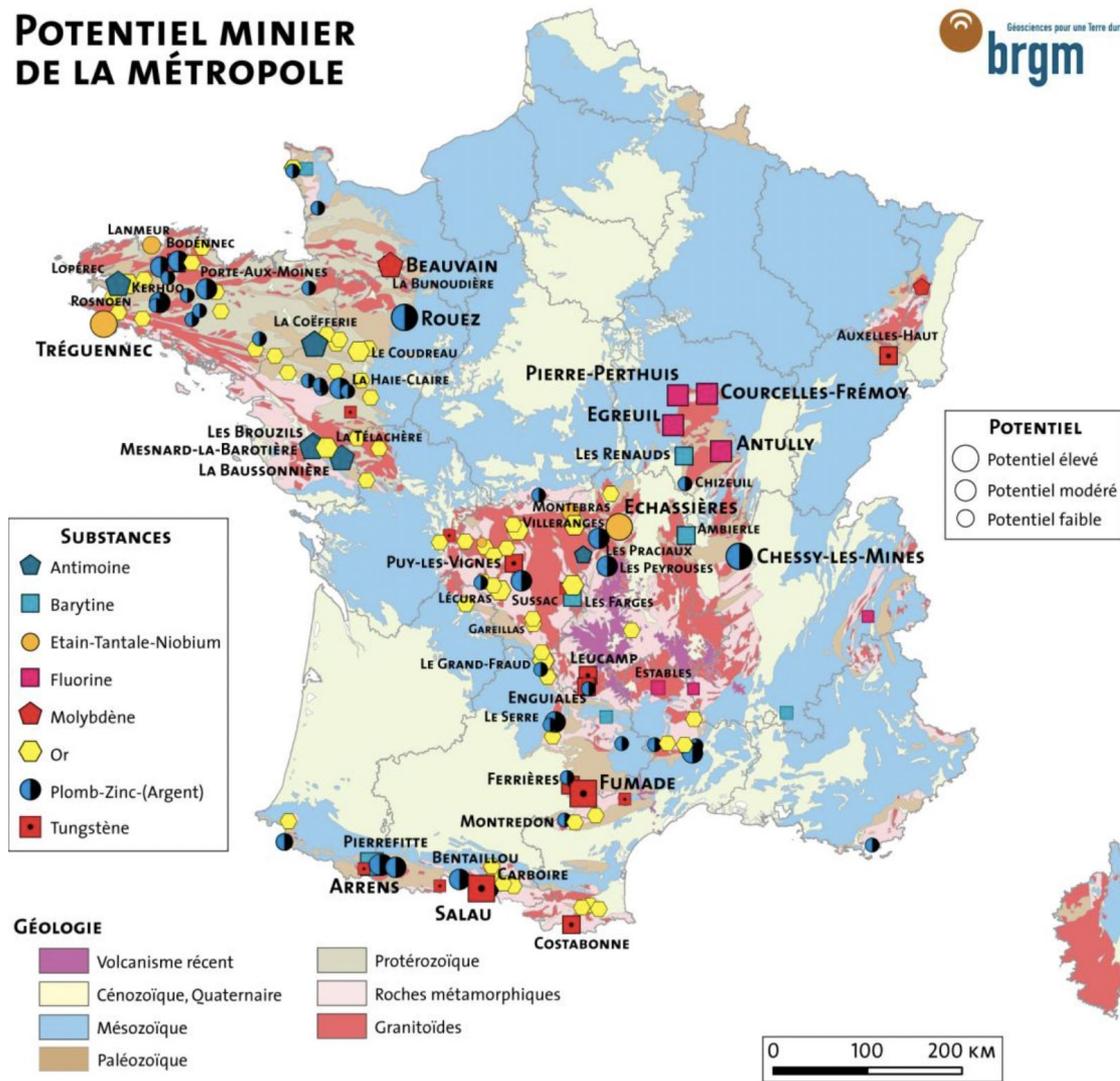


SOCIÉTÉ CIVILE ANONYME des MINES des MALINES (Gard)

Potentiel minier en Occitanie

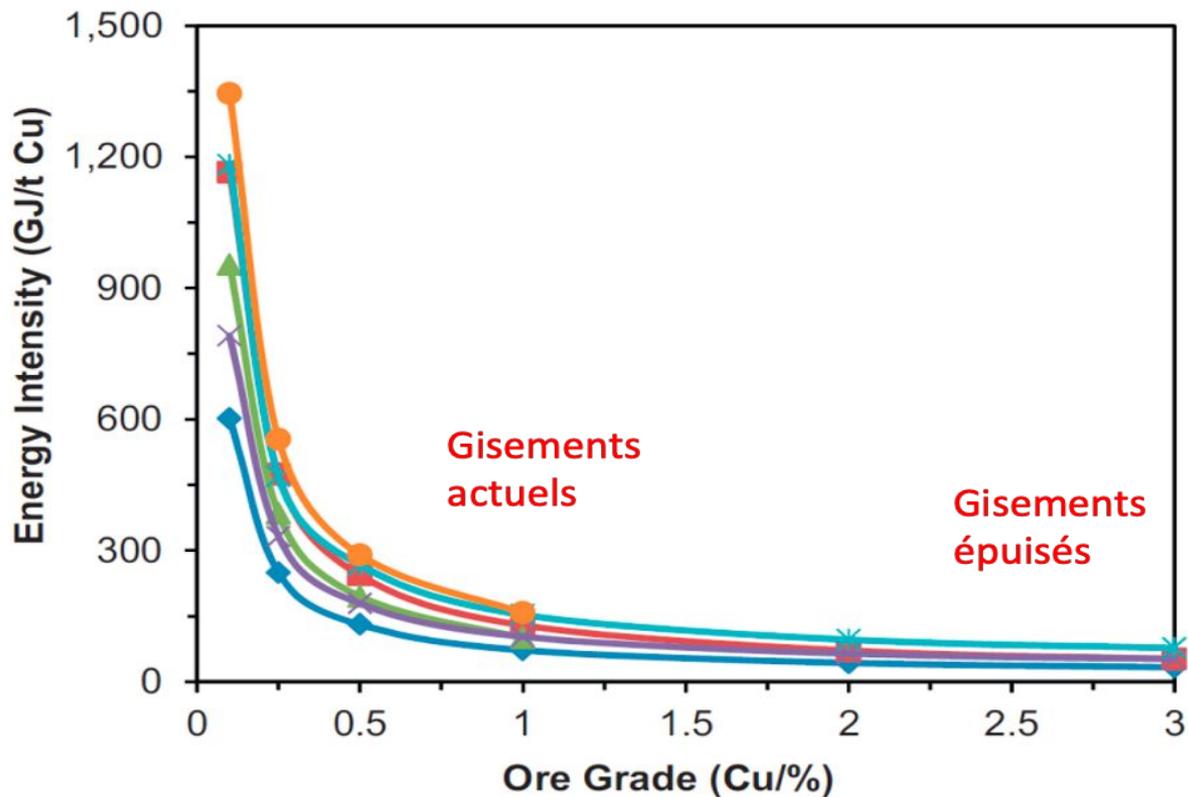


POTENTIEL MINIER DE LA MÉTROPOLE





Point de réflexion sur la difficulté à trouver des gisements concentrés





Point de réflexion sur le recyclage des métaux

1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba	*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra	**	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Uub	113 Uut	114 Uuq	115 Uup	116 Uuh	117 Uus	118 Uuo

Reuter et al., 2013



* Lanthanides

** Actinides

57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

Table ronde

Ressources minérales et transition écologique

réconcilier énergie et environnement



Olivier VIDAL

Directeur de Recherche
CNRS, ISTerre



Sylvia BECERRA

Chargée de recherche
CNRS, GET



Juliette CERCEAU

Maîtresse de Conférences,
IMT Mines Alès, HSM



Corinne CASIOT

Directrice de Recherche
CNRS, HSM



Jérôme CORTET

Professeur,
Université Paul-Valéry



#OREME2024

Journée scientifique de l'OREME 2024

Voyage en Géosciences : de la planète habitable aux ressources minérales critiques

OREME

OBSERVATOIRE DE RECHERCHE
MONTPELLIÉRAIN DE L'ENVIRONNEMENT

#OREME2024