

# Le numérique face au climat : réduire son empreinte et augmenter son impact

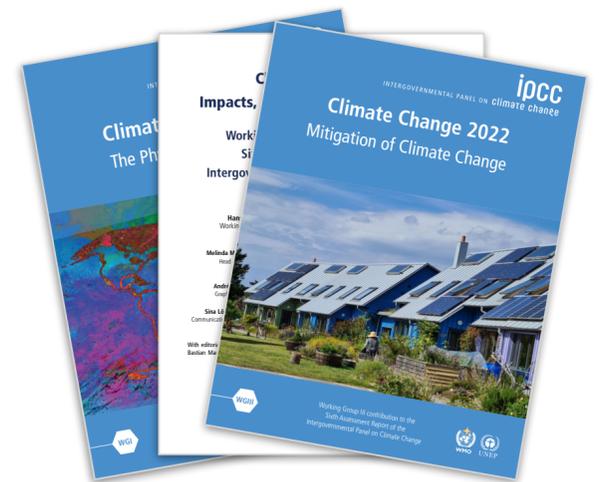
**Nicolas Roussel**

[nicolas.rousseau@inria.fr](mailto:nicolas.rousseau@inria.fr)

# Changement et transition climatiques

# Changement climatique

Le *Groupe Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat* évalue depuis 1988 l'état des connaissances sur cette évolution, ses impacts et les actions possibles



Les gaz à effet de serre (GES) ont un rôle essentiel dans la régulation du climat

**La concentration des GES a considérablement augmentée depuis le 18e siècle**

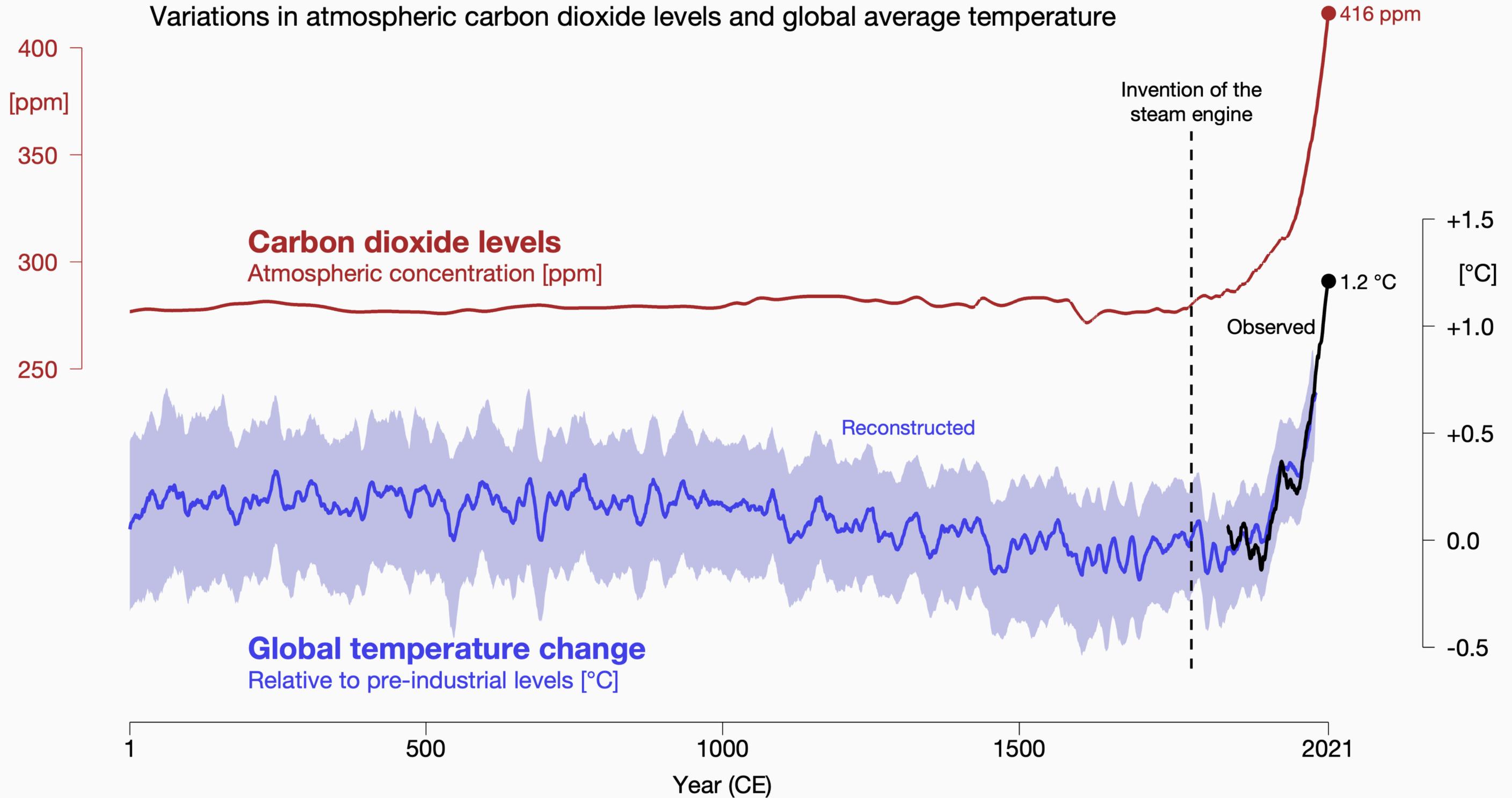
**Cette augmentation est indubitablement liée aux activités humaines**

**L'air, les mers et les terres se réchauffent, avec des conséquences considérables**

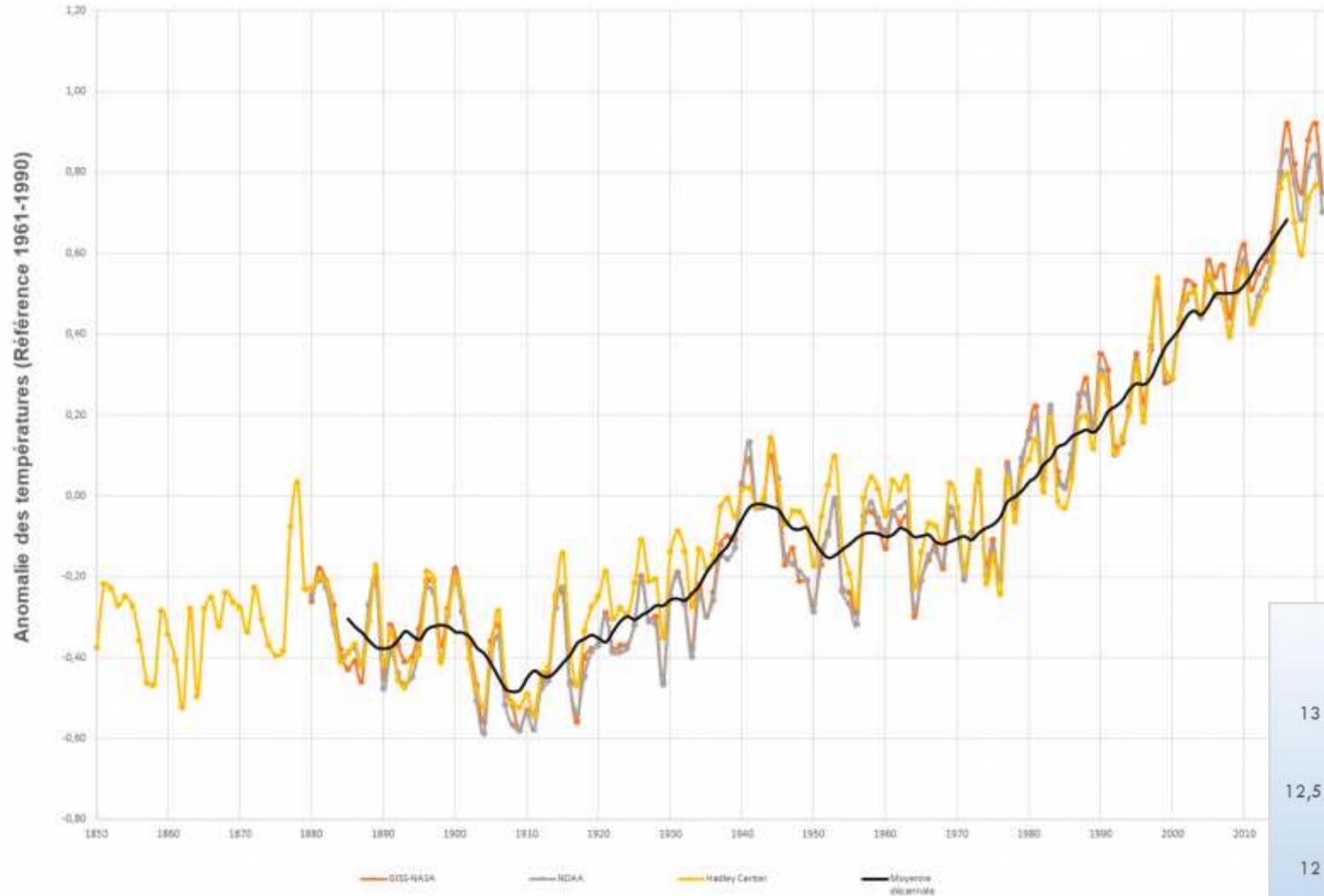
L'ampleur des changements récents et l'état actuel du système climatique sont sans précédent sur plusieurs siècles à plusieurs milliers d'années

# Observed changes in climate over the last 2021 years

Variations in atmospheric carbon dioxide levels and global average temperature



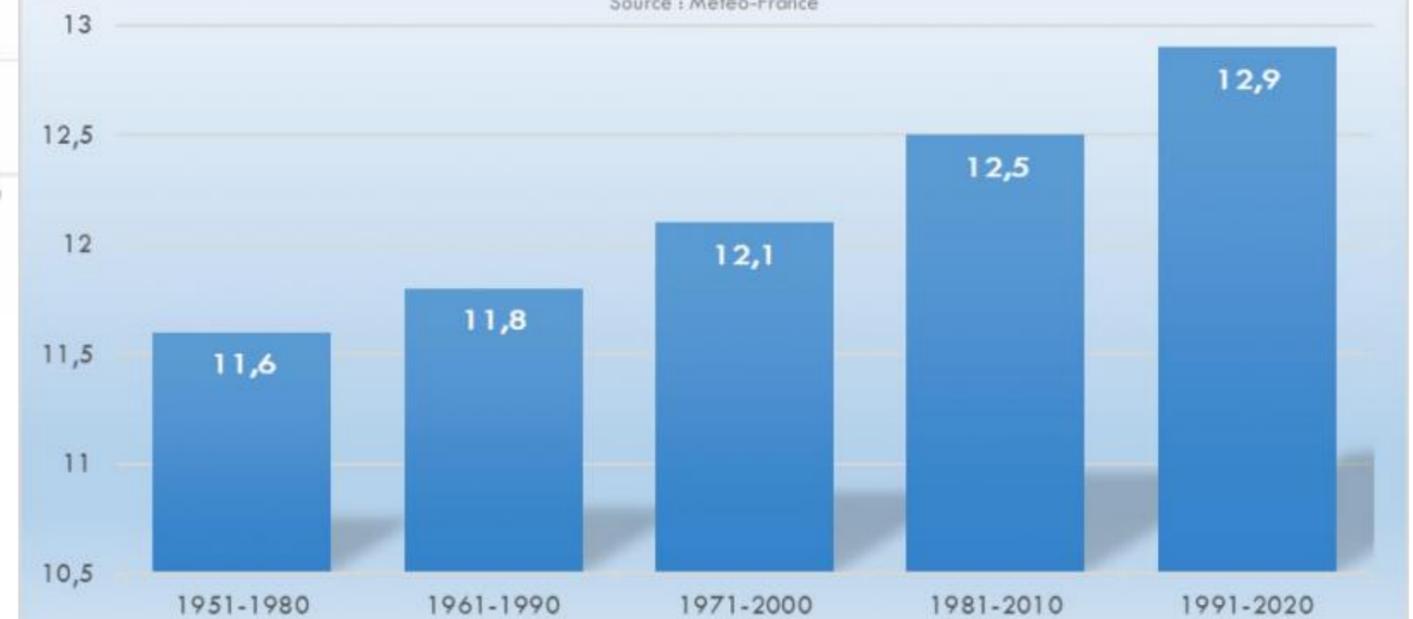
Evolution des températures moyennes mondiales de 1850 à 2021



ÉVOLUTION DES NORMALES EN FRANCE

Température moyenne annuelle

Source : Météo-France



# Changement climatique

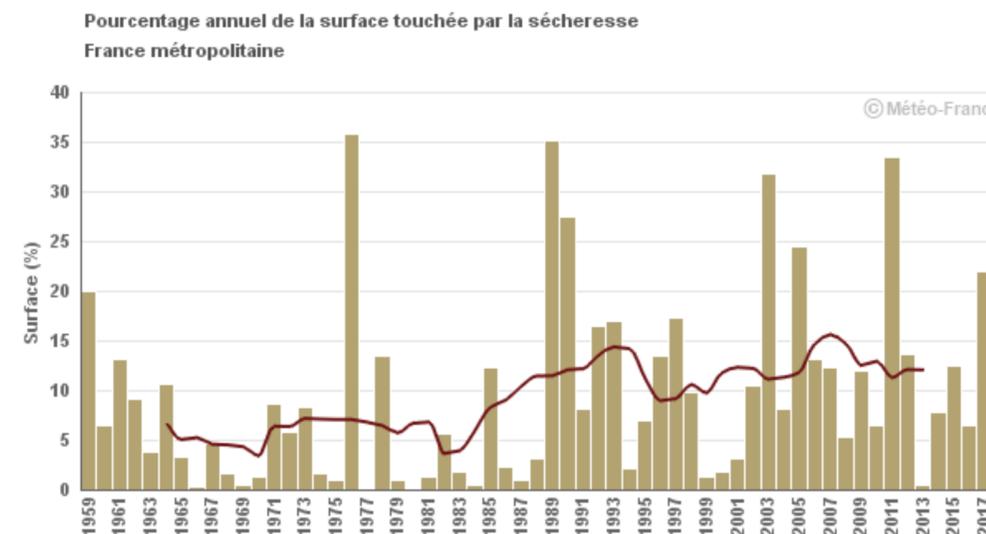
Le niveau des mers monte, leur acidité augmente

Des glaciers fondent, des sols s'assèchent

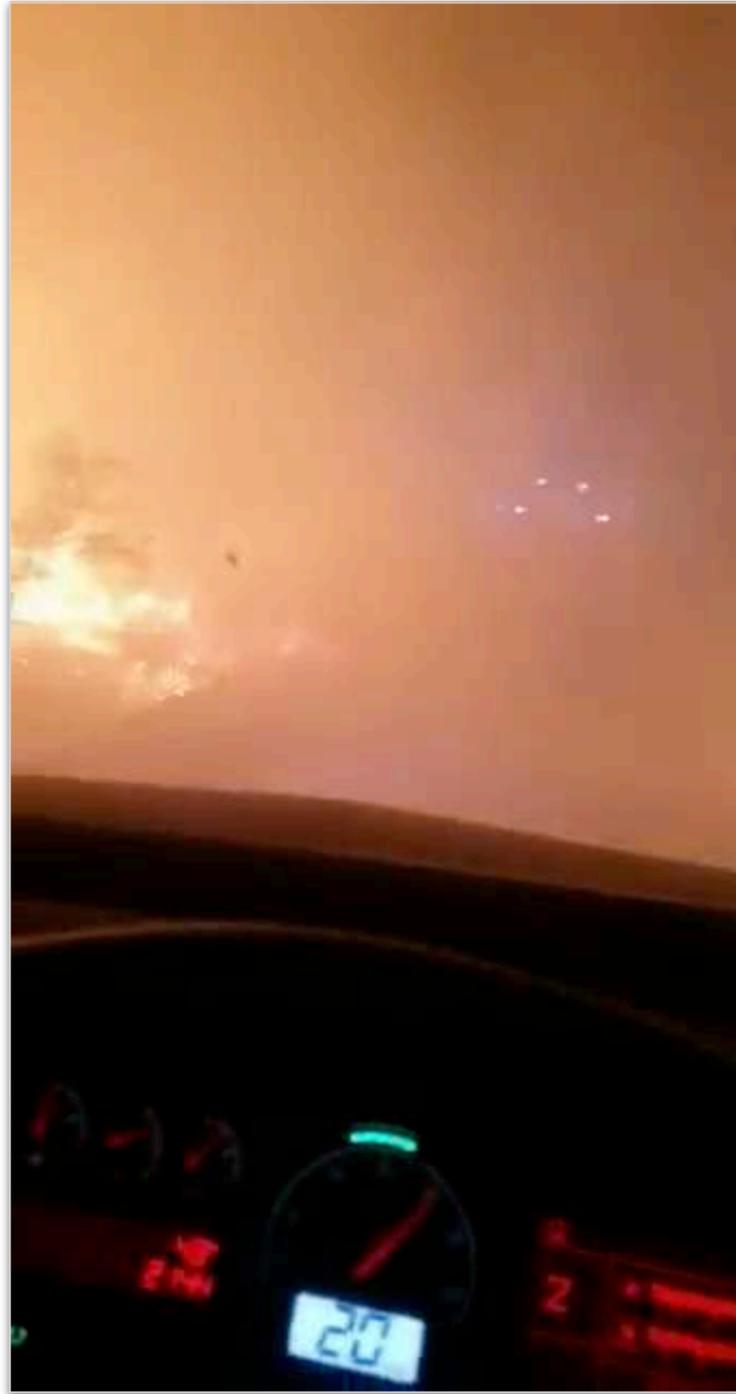
Les rendements agricoles baissent, on vendange fin août et non plus fin septembre

Des espèces animales et végétales disparaissent

La fréquence, l'intensité, la durée et la localisation des événements extrêmes évoluent (tempêtes, inondations, sécheresses, incendies, etc.)



- MONTAGNE**  
-40 cm d'enneigement en 30 ans au col de Porte (Chartreuse, station de ski de basse altitude)  
(source : Météo-France - Onerc)
- TEMPÉRATURE**  
+1,5°C en moyenne en France métropolitaine depuis 1900  
(source : Météo-France - Indicateur Onerc)
- FEUX DE FORÊT**  
50 % des forêts métropolitaines soumises au risque incendie élevé dès 2050  
(source : Mission Interministérielle Changement climatique et extension des zones sensibles aux feux de forêts)
- MOUSTIQUE TIGRE**  
déjà installé dans 45 départements métropolitains  
(source : ministère des Solidarités et de la Santé)
- SÉCHERESSE**  
Un manque de 2 Mds de m<sup>3</sup> d'eau en 2050 si la demande reste stable  
(source : Groupe de travail interministériel sur les impacts du changement climatique, l'adaptation et les coûts associés)
- CULTURES**  
Après + de 35 ans de croissance: stagnation des rendements (ex. : blé tendre, Pays de la Loire)  
(source : Oracis)



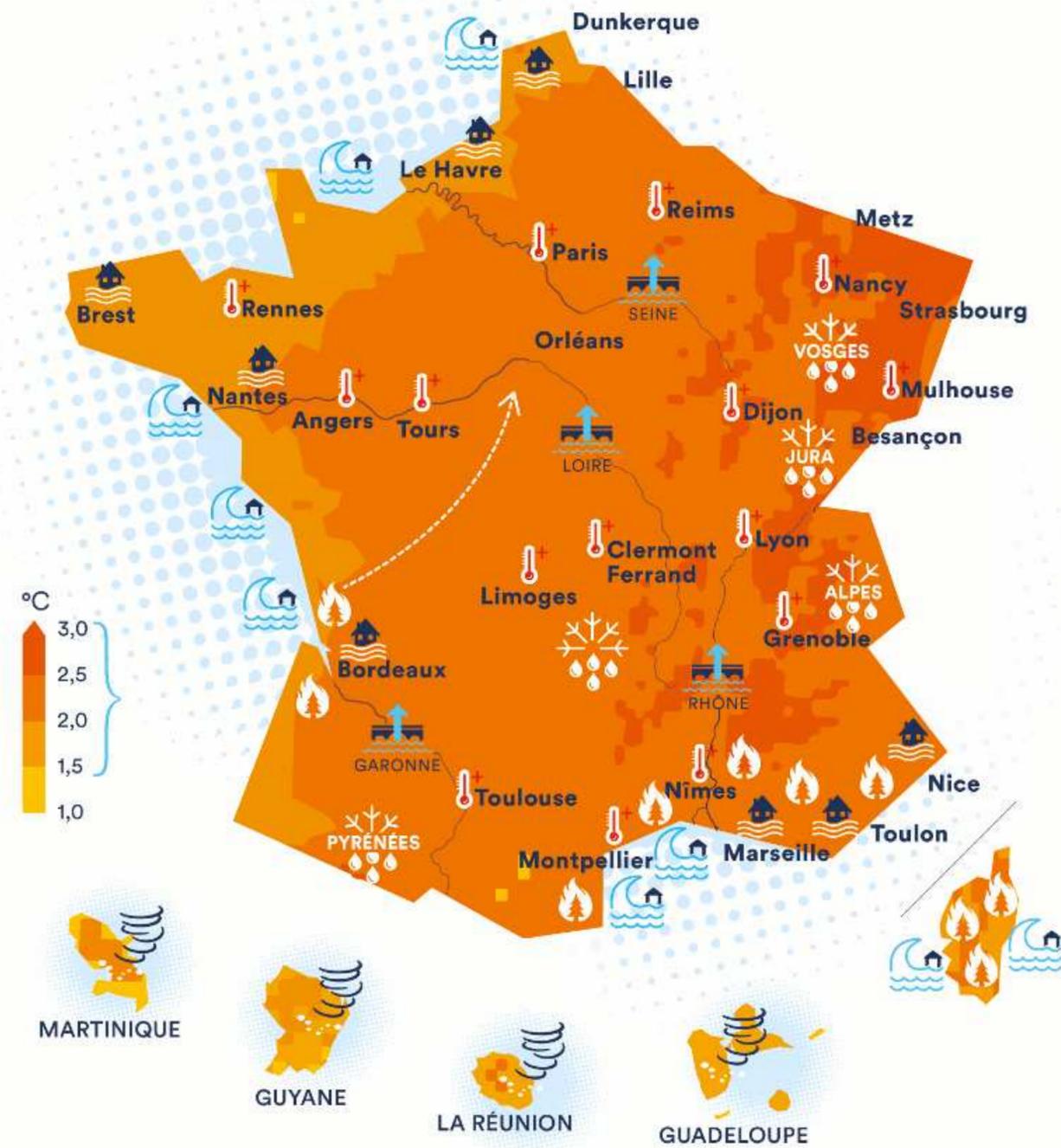
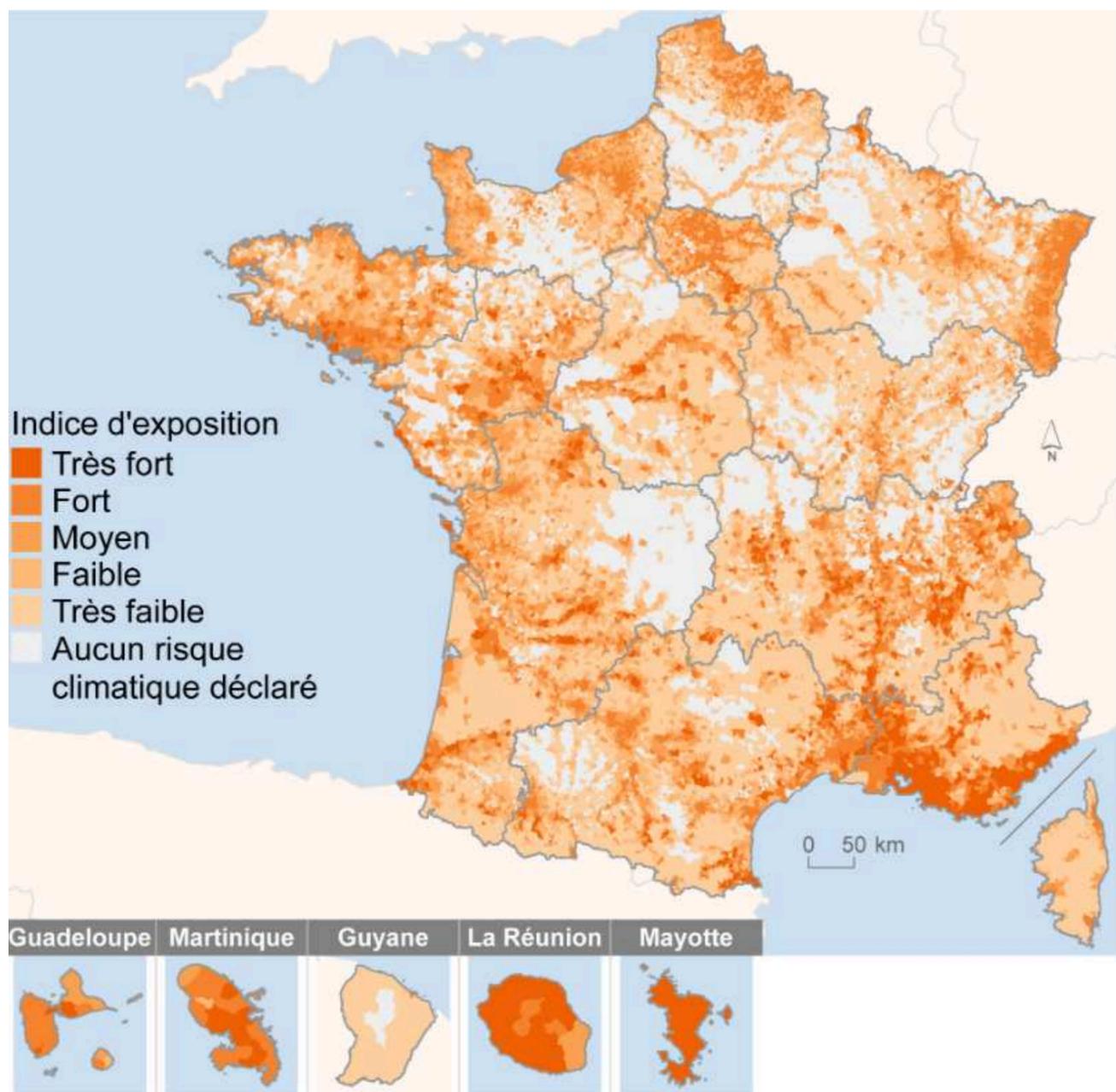
Gironde, août 2022



Pakistan, août 2022



Floride, septembre 2022



# Transition climatique

**D'importants changements climatiques sont en cours**  
en raison de nos activités, et avec des conséquences considérables

**D'autres changements importants doivent être initiés ou accélérés :**  
nous devons changer nos modes de vie pour atténuer les changements climatiques futurs et/ou nous y adapter

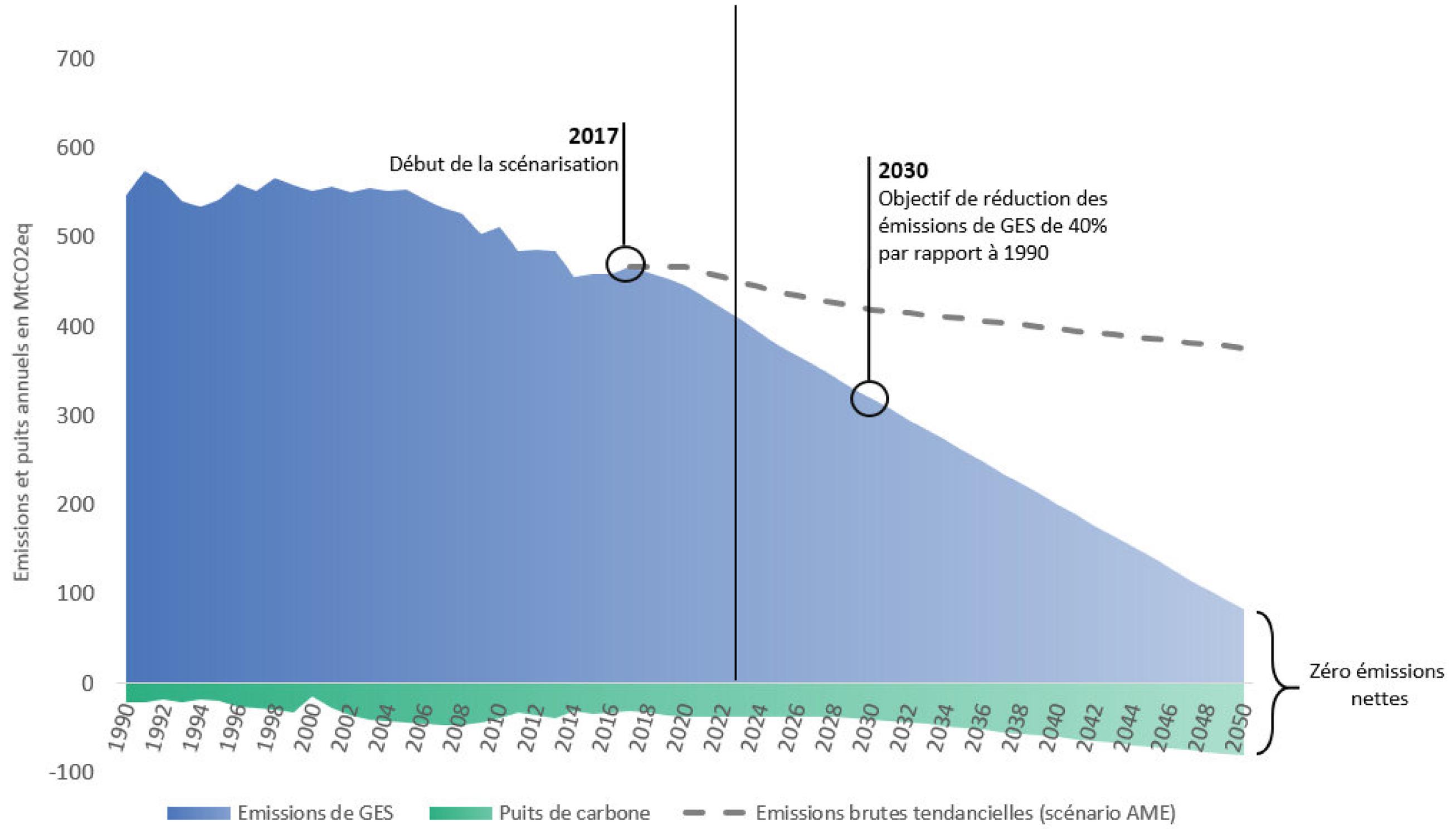
Les enjeux de cette transition sont traités au niveau international (**GIEC, COP**), au niveau européen (**pacte vert**), au niveau national (**stratégie nationale bas-carbone, loi énergie-climat**) et au niveau régional (comité **AcclimaTerra** et feuille de route **NeoTerra** en Nouvelle-Aquitaine)

# Transition climatique

La France s'est fixée l'ambition de réduire les émissions de gaz à effet de serre de 40% d'ici à 2030 (par rapport à 1990) et d'atteindre la neutralité climatique carbone à l'horizon 2050

Pour atteindre la neutralité carbone, il faut (entre autres)

- Décarboner la production d'énergie
- Réduire fortement les consommations d'énergie dans tous les secteurs
- Diminuer les émissions non liées à la consommation d'énergie
- Augmenter les puits de carbone naturels et technologiques



# Empreinte environnementale du numérique

# Empreinte environnementale du numérique

Principaux impacts : épuisement des ressources abiotiques ; tensions sur l'eau douce ; eutrophisation, acidification, pollution des écosystèmes ; réchauffement climatique

En 2019, [selon GreenIT.fr](#)

- 4,2% de la consommation d'énergie primaire / 5,5% de la consommation d'électricité
- 3,8% des émissions de GES (vs. 2,5% pour le transport aérien civil)
- 0,2% de la consommation d'eau

Ces impacts augmentent d'année en année

Les terminaux en sont la principale source (pas les réseaux, pas les serveurs), leur fabrication concentrant le plus d'impacts

La plupart des impacts ont lieu en dehors du territoire national

# Empreinte environnementale du numérique

Le numérique s'est longtemps développé sur une croissance exponentielle des capacités de calcul

Une croissance exponentielle est-elle possible dans un monde fini ? **Non !**

Le numérique doit-il être frugal ? Simple, modéré, retenu, austère ?

Le numérique peut-il être responsable ?

Le développement du numérique est-il compatible avec la transition climatique ?

Où ces questions sont-elles discutées ? Par qui et sur quelles bases ?

Numérique

# Qu'est-ce que le numérique ?

Des sciences et technologies, des industries, des objets et services, des usages, des cultures, des espoirs et fantasmes, etc.

Pourquoi / comment en est-on arrivé là ?

- **Tout ce qui se décrit ou se mesure peut être numérisé**, y compris les algorithmes opérant (de manière générique ou spécifique) sur des données numériques
- **Les capacités** de numérisation, de stockage, de transfert, de calcul et d'interaction **ont incroyablement progressé**
- Internet et des services d'infrastructure ont permis la mise en réseau **et facilité le déploiement et le passage à l'échelle**
- Les batteries et réseaux sans fil ont contribué à la **diversification des usages**

Le numérique doit être considéré dans sa globalité (l'IA c'est du numérique)

# Le numérique ne s'impose pas à nous

Les technologies numériques qui auront un impact significatif dans la dizaine d'années à venir existent sans doute déjà depuis dix ans

Pour autant, **rien de ce qui concerne le numérique n'est inéluctable**

Ce n'est pas un phénomène naturel

Il n'y a pas de train, de course, de virage ou de tournant à ne pas rater :  
il n'y a pas de route tracée, les trajectoires et les buts peuvent être différents

**Le numérique n'est qu'un moyen, et pas nécessairement le meilleur**

Il n'est et ne sera que ce que nous voulons qu'il soit

Il doit être à notre service

# Quelles opportunités le numérique offre-t-il ?

Il permet d'appréhender des situations, phénomènes ou problèmes complexes

Il permet d'explorer des possibles, de tester des hypothèses

Il se prête particulièrement bien aux approches du troisième ordre :

- faire
- améliorer la manière de faire
- améliorer la manière d'améliorer

Il peut être un puissant moyen d'autonomisation et d'encapacitation des personnes

Le numérique peut aider à se coordonner sur des problèmes globaux et à diffuser les solutions à des problèmes universels

**Numérique & climat**

# Numérique et climat

*“La recherche et l'innovation doivent apporter leur concours à la préservation et à la mise en valeur de l'environnement”* (article 9 de la [Charte de l'environnement](#) de 2005)

Feuille de route gouvernementale [“Numérique et Environnement”](#) de 2021

- Développer la connaissance de l'empreinte environnementale numérique
- Réduire l'empreinte environnementale du numérique, liée à la fabrication des équipements et au développement des usages
- Faire du numérique un levier de la transition écologique et solidaire

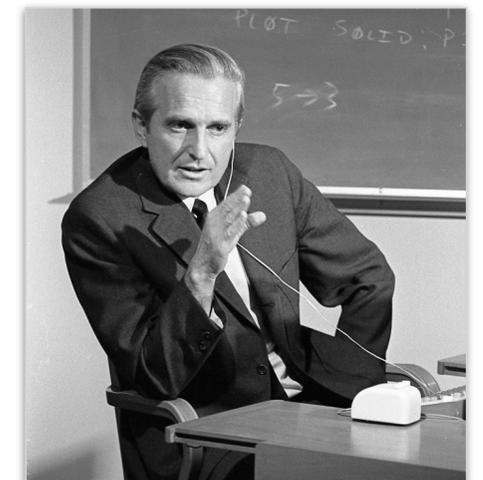
# Numérique et climat

Il faut réduire l'empreinte environnementale du numérique

Il faut aussi (et surtout) augmenter l'impact du numérique, améliorer son efficacité : viser un maximum de résultats avec un minimum de moyens

Le numérique doit nous aider à faire face à l'accélération de la complexité et de l'urgence des enjeux qui se posent à nous

*Meilleurs nous serons à nous améliorer,  
plus vite nous nous améliorerons  
(Douglas Engelbart)*



# Une approche AAA du sujet

**Atténuation** : réduire les émissions de GES, les capturer et les stocker

**Anticipation** : améliorer notre compréhension des changements climatiques et de leurs effets (vagues de chaleur, manque d'eau, feux, tempêtes, grêle, inondations, etc. à répétition), améliorer notre capacité à les prévoir

**Adaptation** : améliorer notre capacité à faire face aux risques climatiques et aux crises qui pourraient en découler, à les éviter ou à les gérer

Le numérique peut-il aider sur ces trois volets ? Oui !

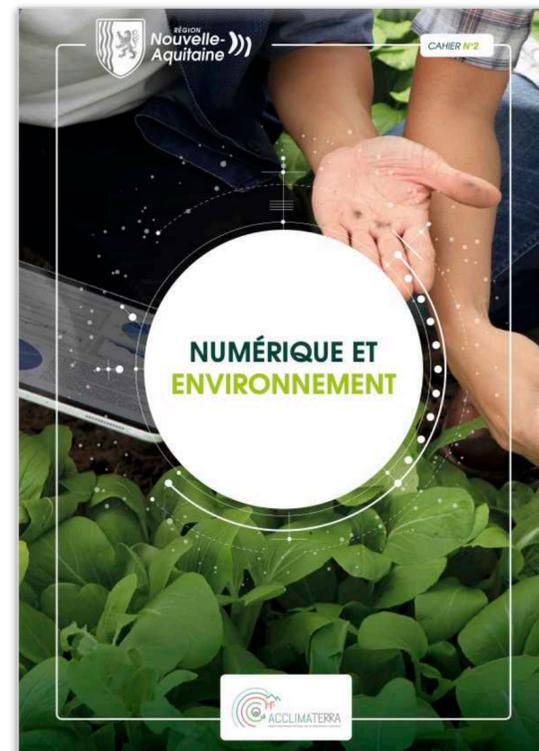
A suivre : une série d'exemples qui relèvent de l'un ou plusieurs des trois A

# Atténuation : réduire l'empreinte du numérique

Comprendre/mesurer les coûts et externalités actuels  
(ADEME, ARCEP, [GDS Ecoinfo](#), [GDR Labos1point5](#), [Boavizta](#), etc.)

*Ce qui ne se mesure pas, ne s'améliore pas... mais ça ne suffit pas !*

On peut commencer par "éviter, réduire et compenser" : refuser, réduire, réparer, réutiliser et/ou recycler le matériel



# Atténuation : réduire l'empreinte du numérique (suite)

On peut aussi agir sur la conception des systèmes et sur leur intégration

- [Guide de conception responsable de services numériques](#) de l'Institut du Numérique Responsable, ressources de la [Mission interministérielle Numérique écoresponsable](#), etc.
- Analyser en temps réel la consommation énergétique d'un logiciel, aider les développeurs à les "éco-concevoir", optimiser le code ([PowerAPI](#), projet [Distiller](#), startups [Yubik](#) et [EnergyScope](#))
- Prototyper des capteurs capables de fonctionner grâce à la récupération d'énergie : variations de température, vibrations, ondes électromagnétiques, etc. (défi [ZEP](#))
- Eco-concevoir un cloud pour en réduire les impacts (défi Inria - [OVHCloud](#))
- Décarboner l'électricité consommée par un datacenter (projet [Datazero](#))
- Valoriser la chaleur fatale des microprocesseurs (défi [PULSE](#))

# Atténuation : réduire l'empreinte d'autres secteurs

## Mieux comprendre les impacts actuels

- Analyser en temps réel la consommation énergétique d'un bâtiment ([iQspot](#))
- Modéliser de façon plus fine la consommation énergétique d'un avion (projet [Perf-AI](#))
- Rendre visibles les impacts lointains de nos actions (projet Be-Aware)
- Estimer les réductions et évitements d'émissions réalisés grâce au numérique ([coalition européenne pour le numérique vert](#))

## Aider à trouver des alternatives

- Réduire les intrants : zéro pesticide de synthèse (PEPR Agroécologie numérique)
- Simplifier les modèles et la simulation des plasmas utilisés pour la conception des tokamaks (AEx [Malesi](#))
- Caractériser le potentiel géothermique des sous-sols pyrénéens (projet [PIXIL](#))

# Anticipation

Les scientifiques du climat utilisent depuis longtemps des données, modèles et simulations pour observer, comprendre et prédire les phénomènes naturels

Quelques exemples de recherches en cours

- Nouvelles méthodes d'IA pour exploiter les données de [Tara Oceans](#) (défi [OcéanIA](#))
- Flux océaniques côtiers et littoraux : couplage de modèles, incertitudes (défi [Surf](#))
- Dynamiques aléatoires de la couche supérieure des océans : température, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, acidité, etc. (ERC [STUOD](#))
- Phénomènes naturels à grande échelle : méthodes issues de la physique statistique (PEPR Agroécologie numérique)
- Aléas gravitaires en montagne (AEx [Granier](#))
- Biodiversité de l'Amazonie ou des lacs alpins sous l'influence du changement climatique et d'autres activités humaines (Pleiade)

# Anticipation (suite)

Autres sujets liés à la psychologie humaine, aux dynamiques sociales

- Comprendre les processus qui amènent à prendre une décision plutôt qu'une autre concernant ses habitudes en termes de mobilité (projet [Ecomob](#))
- Le numérique pourrait aider à sensibiliser les populations aux changements à venir ou en marche



# Adaptation

Pour pouvoir s'adapter, il faut connaître les risques et les comprendre

- Conception de réseaux électriques résilients dans le contexte d'événements climatiques rares et d'introduction massive d'énergie renouvelable (PEPR Technologies avancées pour les systèmes énergétiques)
- Estimation des risques systémiques globaux, éléments d'analyse stratégique à destination du public et du privé (AEx [RSG](#))
- *Hackers Against Natural Disasters* : informer, entraîner, alerter

Il faut nous interroger sur la résilience de nos infrastructures

Il y a peut-être moins à dire aujourd'hui mais beaucoup à faire, sur la gestion des crises et de leur enchaînement notamment

# Focus : risques de submersion et d'inondation

Un exemple étudié dans le cadre du projet [Uhaina](#)

(Inria, BRGM, CNRS, Inria, Bordeaux INP, université de Bordeaux, université de Montpellier, UPPA)

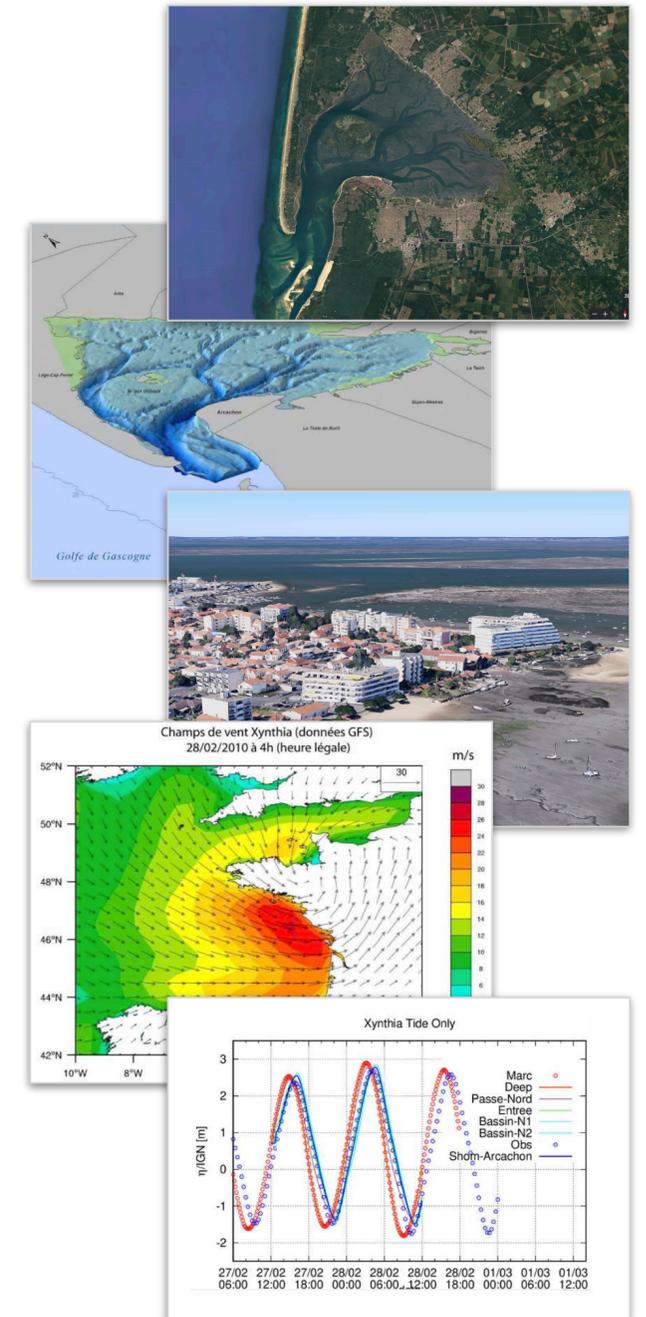
Un problème : quels risques autour du Bassin d'Arcachon ?

Des observations/données

- données topographiques, bathymétriques, bâti et structures, etc.
- données météo (réelles ou simulées), jauges d'observation

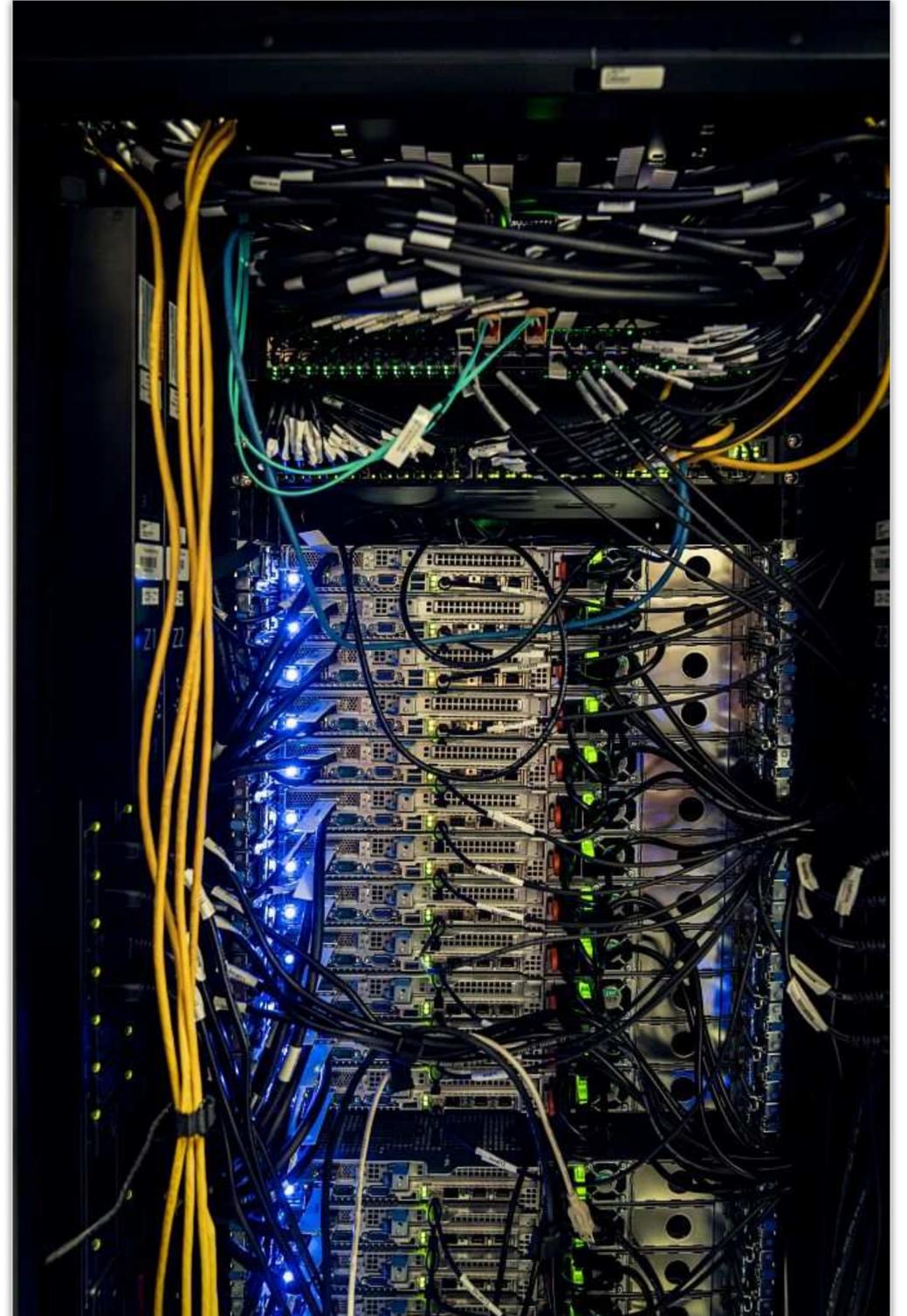
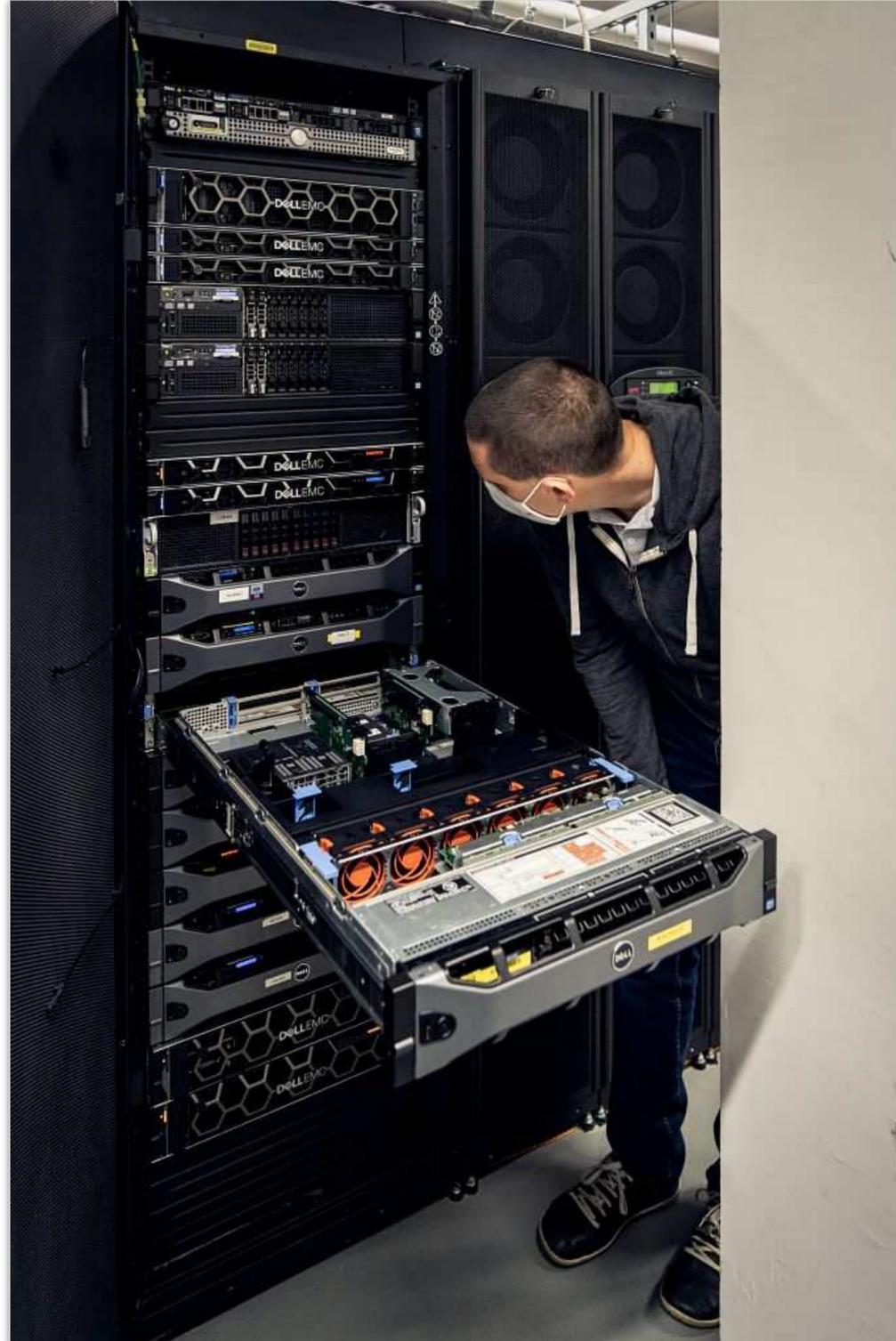
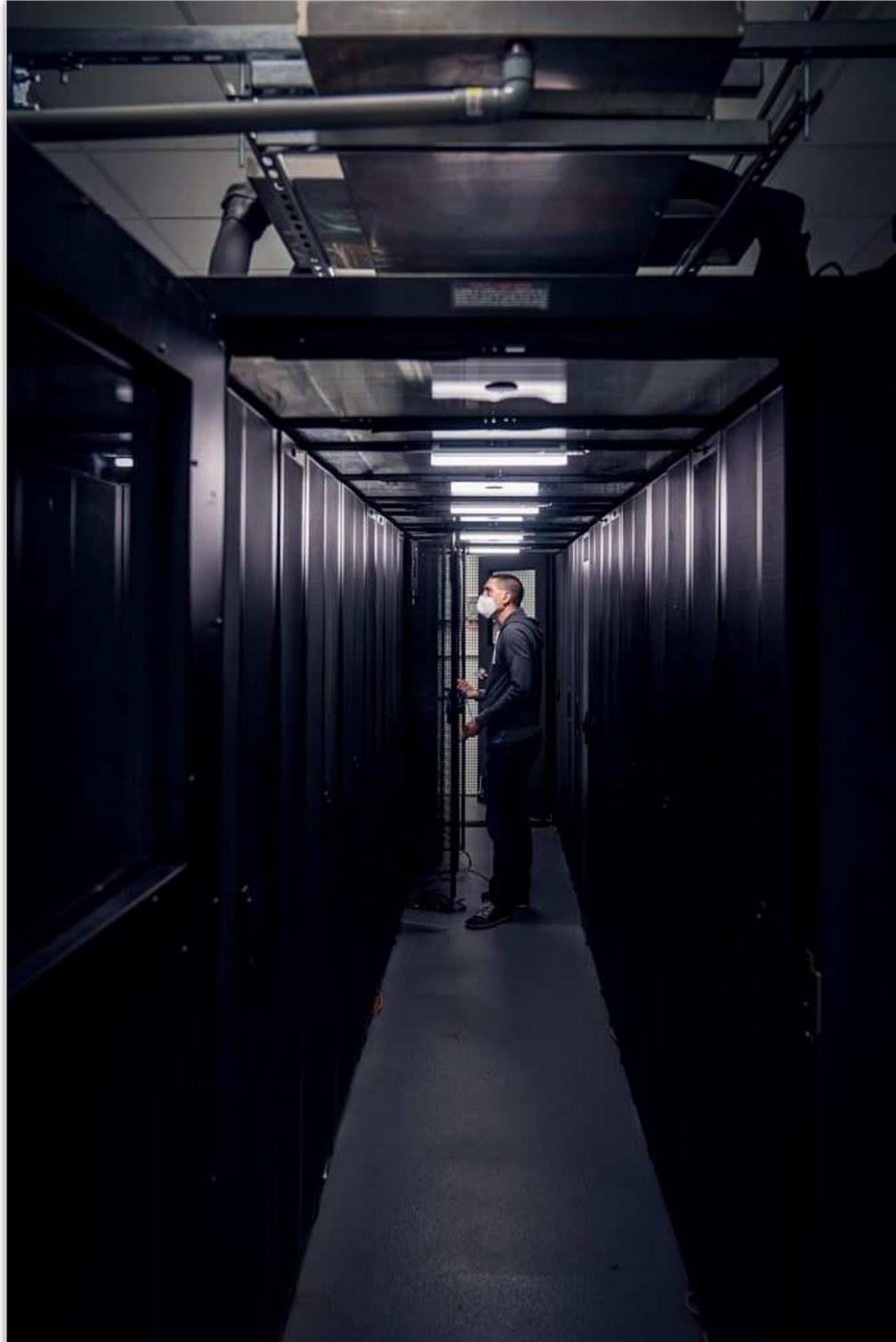
Des hypothèses, des lois physiques, des équations

Un maillage, de très nombreux calculs et la présentation des résultats sous forme statique, dynamique ou interactive









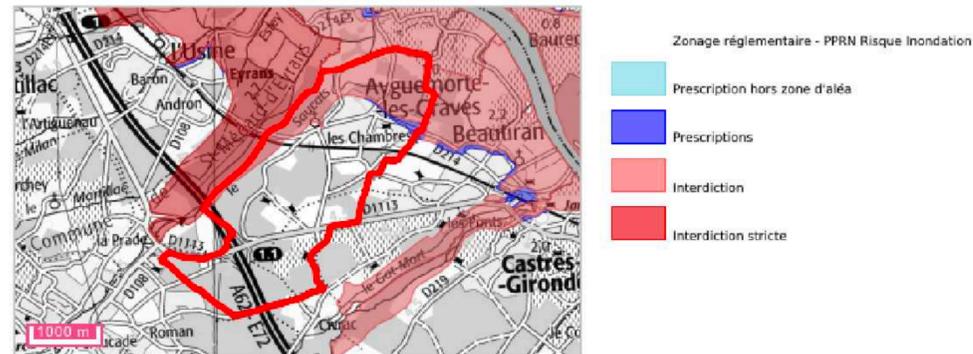
Tempête Xynthia, 2010



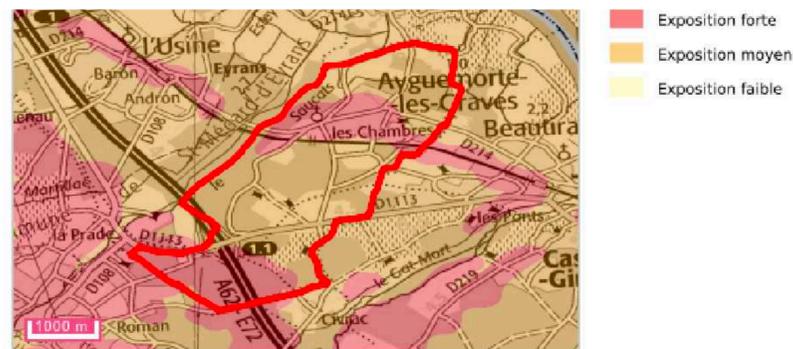


# Focus : carte de risques et niveaux de vigilance

## Inondation



## Argile



## Sismique



Source : [georisques.gouv.fr](http://georisques.gouv.fr)

## 4 niveaux de vigilance pour les phénomènes :

vent violent, vagues-submersion orages, neige-verglas, avalanches

- **Vigilance rouge** : Une v phénomènes dangereux prévus. Tenez-vous régulièrement l'évolution de la situation et suivez les consignes de sécurité é
- **Vigilance orange** : Soye dangereux sont prévus. l'évolution de la situation émis par les pouvoirs p
- **Vigilance jaune** : Soyez activités sensibles au ri aux crues, des phénom occasionnellement et le orage d'été, montée des eaux) sont en effet prévus. Tenez-vous au courant de l'évolution de la situation.
- **Vigilance verte** : Pas de vigilance particulière.



Préfète de la Nouvelle-Aquitaine et de la ... 56m

⚠️⚡ Le département de la #Gironde est placé à partir de 23h en #vigilancejaune pour le risque #orages

✅ Soyez attentifs si vous pratiquez des activités sensibles au risque météorologique et suivez l'évolution de la situation sur @VigiMeteoFrance ou [meteofrance.com](http://meteofrance.com)

VIGILANCE ORAGES



RESPECTEZ les consignes des autorités  
INFORMEZ-VOUS



Soyez attentifs si vous pratiquez des activités sensibles au risque météorologique

Source : [vigilance.meteofrance.fr](http://vigilance.meteofrance.fr)

# Focus : carte de risques et niveaux de vigilance

Peut-on faire mieux ? Quelques pistes possibles

- Expliquer les différents niveaux de risque en les rendant plus concrets et contextualisés
- Expliquer ce qui peut être fait en amont pour atténuer le degré d'exposition aux risques, en donnant un aperçu de l'effet des mesures possibles
- Expliquer les différents niveaux de vigilance en les rendant plus concrets et contextualisés (là encore)
- Rappeler ce qui aurait pu être fait en amont pour atténuer le degré d'exposition aux risques particuliers signalés, et expliquer ce qu'il est encore temps de faire

**Conclusion**

# Conclusion

Le numérique est un outil puissant et sans doute utile pour essayer d'atténuer les changements climatiques, les anticiper et nous y adapter

Avec ou sans numérique, il y a beaucoup à faire pour mettre en œuvre la transition climatique qui s'impose face aux changements en cours et à venir

Une transition, c'est censé être transitoire... Quel est le but visé ?

Quel monde, quelle société, quel numérique voulons-nous demain ?

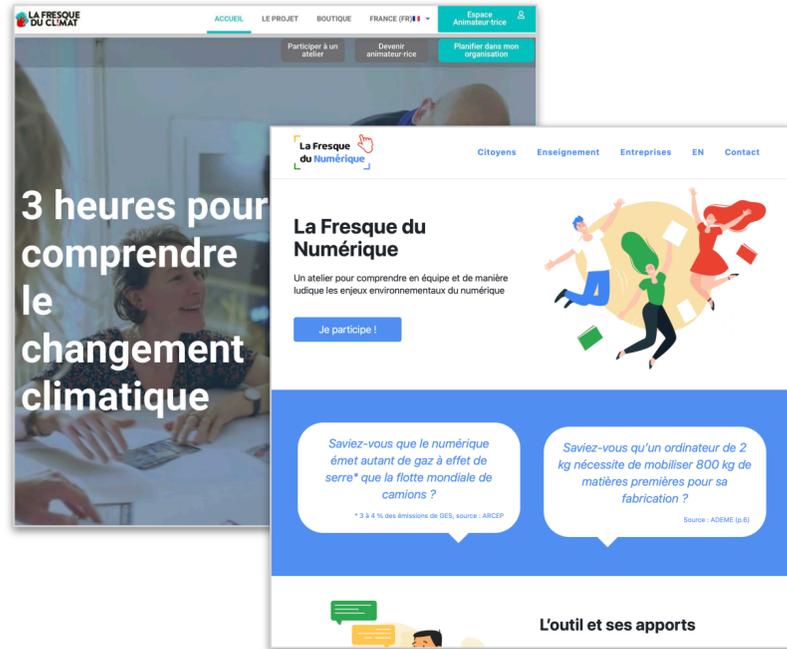
# Quel numérique pour la transition climatique ?

Ce n'est pas vraiment une question d'invention ou d'innovation

**C'est une question de conception, de *design***

Décrire et comprendre les situations existantes ou à venir,  
identifier des besoins/désirs, se fixer des objectifs,  
déterminer l'espaces des possibles,  
explorer des alternatives,  
faire des choix

# Pour en savoir plus



**3 heures pour comprendre le changement climatique**

## La Fresque du Numérique

Un atelier pour comprendre en équipe et de manière ludique les enjeux environnementaux du numérique

[Je participe !](#)

Saviez-vous que le numérique émet autant de gaz à effet de serre\* que la flotte mondiale de camions ?  
\* 3 à 4 % des émissions de GES, source : ARCEP

Saviez-vous qu'un ordinateur de 2 kg nécessite de mobiliser 800 kg de matières premières pour sa fabrication ?  
Source : AODM (p.6)

L'outil et ses apports



**FUN MOOC**

Vous êtes ici: Accueil > Cours > Impacts environnementaux du numérique

## Impacts environnementaux du numérique

Ref. 41025

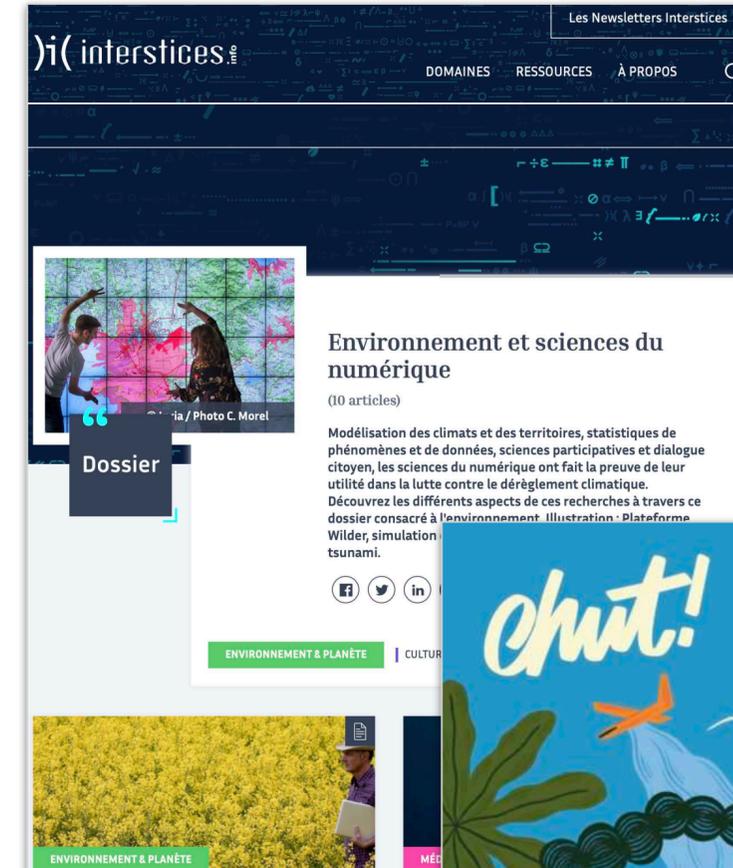
Environnement et développement durable Numérique et technologie

Effort : 5 heures Rythme: Auto-rythmé

Impact Num est un Mooc pour se questionner sur les impacts environnementaux du numérique, apprendre à mesurer, décrypter et agir, pour trouver sa place de citoyen dans un monde numérique.



**Inria**



**interstices** info

Les Newsletters Interstices

DOMAINES RESSOURCES À PROPOS

## Environnement et sciences du numérique

(10 articles)

Modélisation des climats et des territoires, statistiques de phénomènes et de données, sciences participatives et dialogue citoyen, les sciences du numérique ont fait la preuve de leur utilité dans la lutte contre le dérèglement climatique. Découvrez les différents aspects de ces recherches à travers ce dossier consacré à l'environnement. Illustration: Plateforme Wilder, simulation tsunami.

[ENVIRONNEMENT & PLANÈTE](#)

### #91- Risques, résiliences et hacking - Gaël Musquet

Comment anticiper et gérer les catastrophes ? Gaël Musquet est météorologue, informaticien, et spécialiste de l'anticipation et de la gestion des catastrophes naturelles.

Gaël est un touche-à-tout mais il se définit par sa posture de curiosité, de doute et d'ingénierie. Il peut faire de concret pour tenter de résoudre les choses et les systèmes qui ne fonctionnent pas, et forcer le cours de choses, et forcer le cours de choses. Alors qu'il semble maintenant certain qu'il faut commencer à parler d'anticipation des risques, il est important.

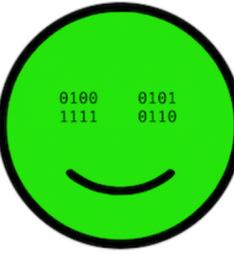


**#77 - La fin de la croissance ? MEADOWS**

L'auteur du fameux rapport « The Limits To Growth », le point, 50 ans après...



## l'Octet Vert



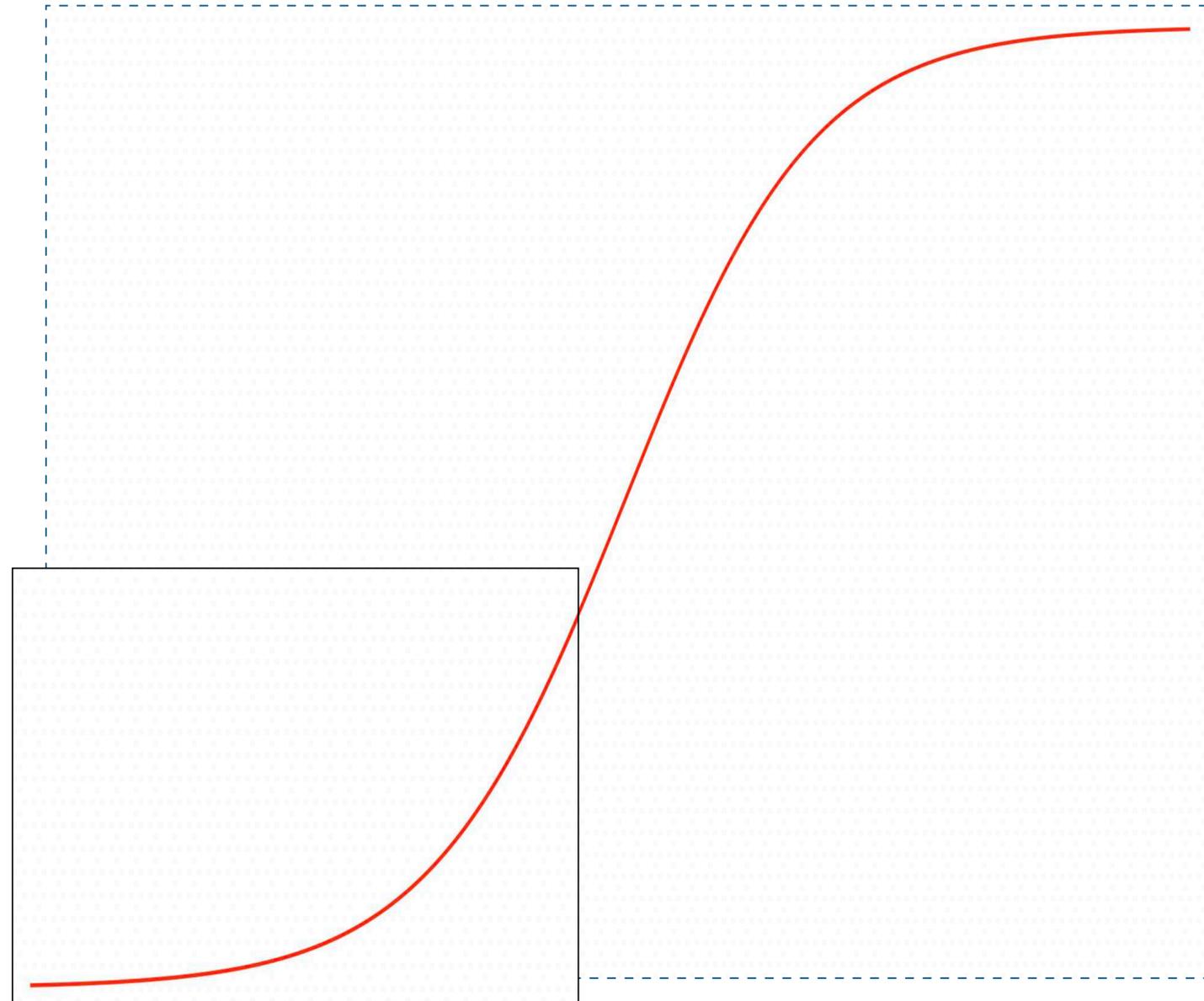
0100 0101  
1111 0110

Climat, numérique et bonne humeur par Tristan Nitot



# Croissance exponentielle... ou pas

Fonction  
exponentielle



Fonction  
logistique