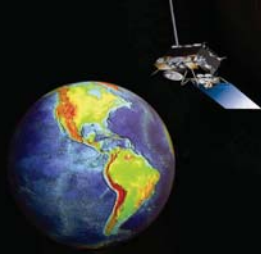
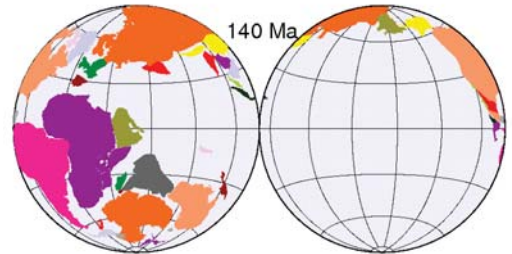


La Terre et l'Environnement observés depuis l'espace



Anny Cazenave
Chaire annuelle 2012-2013 « Développement durable, Environnement, Energie et Société »
Collège de France
21 mars 2013

Mouvement des continents aux échelles de temps géologiques (derniers 140 millions d'années)



Alex Copley, Ashley Kennard, Jessica Kim, and Lindsey Standliff

2000

La mer d'Aral

approximate shorelines, 1960

50 km

2002

50 km

2004

50 km

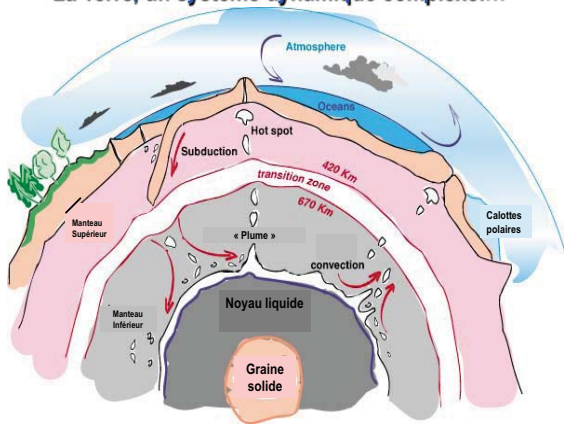
2006

50 km



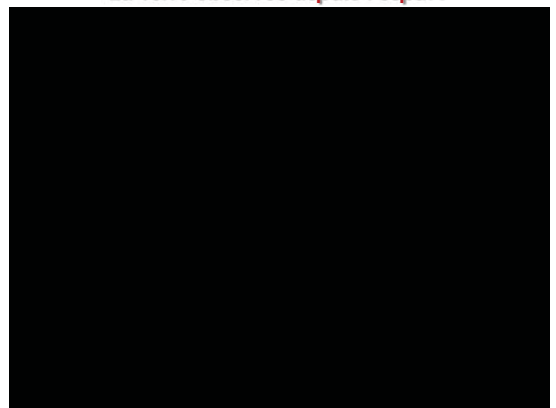
Les changements rapides induits par les activités humaines sont-ils de nature à déstabiliser les équilibres naturels?

La Terre, un système dynamique complexe....



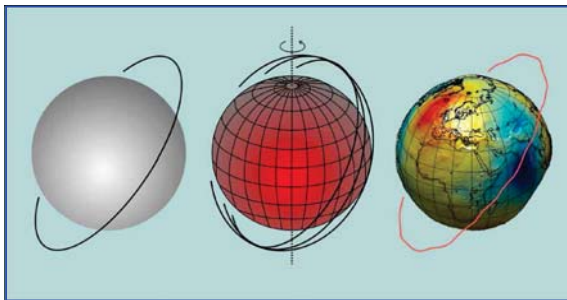
Source : LEGOS

La Terre observée depuis l'espace



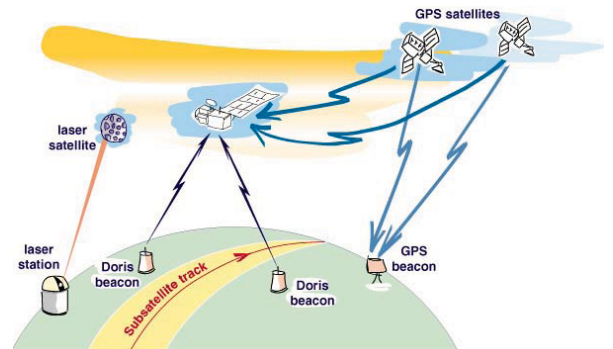


L'orbite du satellite



Source : R. Rummel

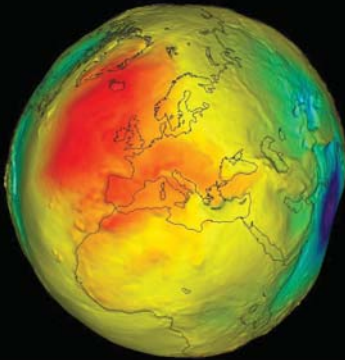
Les principales techniques de mesure des orbites des satellites



Le géoïde: surface 'équipotentielle' du champ de gravité
 → coïncide avec le niveau moyen des mers au repos
 → visualise les variations géographique de la gravité

Des générations successives de modèles de gravité

- 1965: SE-1
- 1975: GRIM-1
- 1976: GRIM-2
- 1983: GRIM-3
- 1991: GRIM-4
- 1999: GRIM-5
- 2001: EIGEN-1
- 2004: EIGEN-2
- 2006: EIGEN-4
- 2010: EIGEN-GOCE



Source: R. Biancale

Le satellite « gradiométrique » GOCE (ESA, 2009): une révolution pour la mesure du champ de gravité

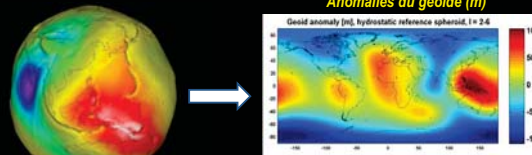


Source: ESA

Le géoïde (forme de la Terre) 'grande échelle' mesuré par le satellite GOCE

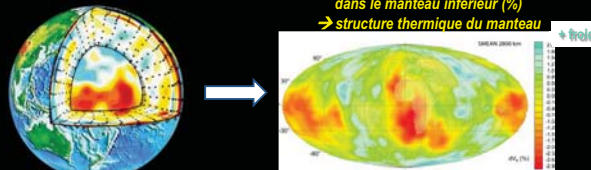
Les creux et les bosses du géoïde....

Anomalies du géoïde (m)



.... Une image de l'intérieur de la Terre

Anomalies de vitesses sismiques dans le manteau inférieur (%)
→ structure thermique du manteau

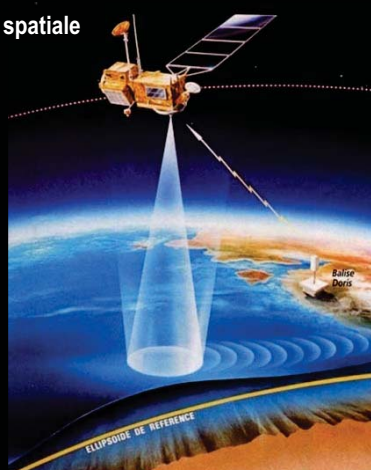


Becker & Boschi, 2002
Et aussi B. Romanowicz

+ froid

+ chaud

L'altimétrie spatiale



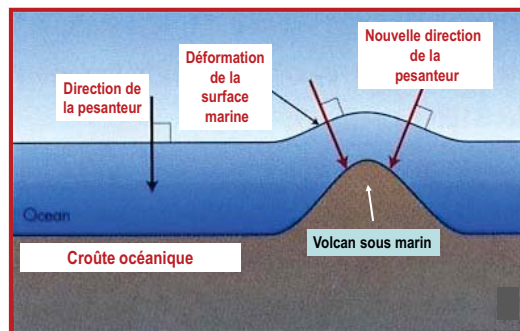
Principe de l'altimétrie par satellite

Couverture des océans en 10 jours



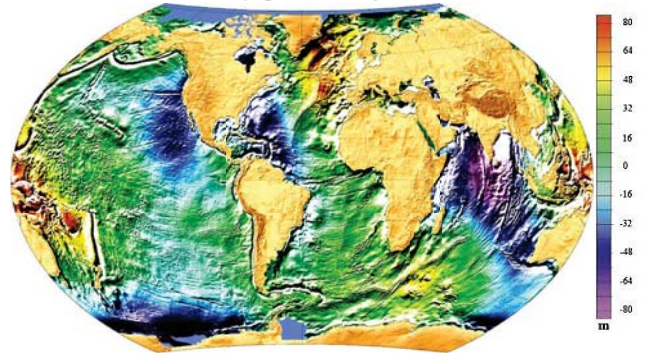
Les creux et les bosses de la surface de la mer.....

- Variable dans le temps → dynamique de l'océan, marées
- Permanente → géoïde → champ de gravité



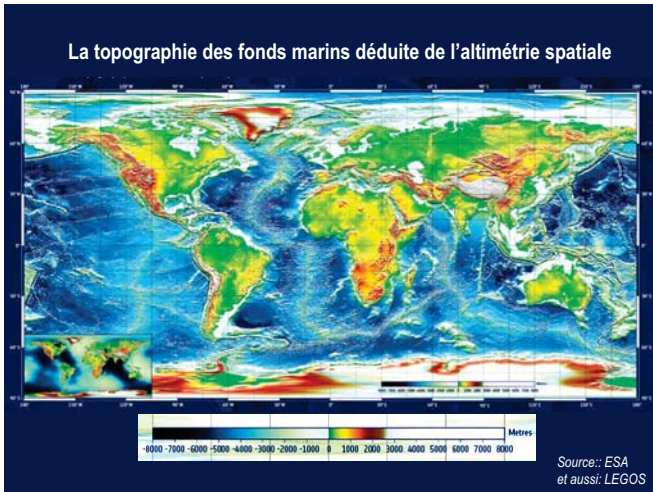


Les creux et les bosses 'permanents' de la surface de la mer (= géoïde marin)

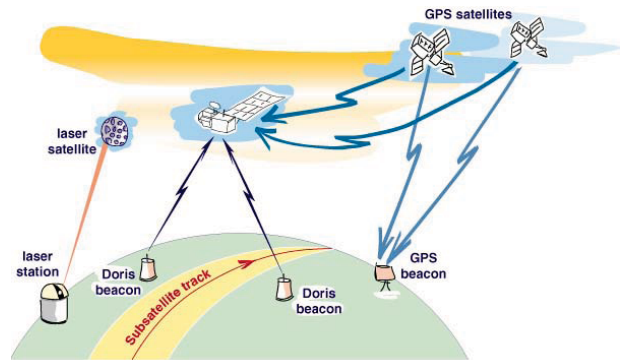


Source : CLS

La topographie des fonds marins déduite de l'altimétrie spatiale



Géodésie spatiale et positionnement de points à la surface de la Terre



Journal « Le Monde » 5 octobre 1967

SCIENCE SPATIALE SUPPLEMENT AU NUMERO

LA TERRE : SA FORME

Des satellites arpenteurs

Par JEAN KOVALEVSKY

Quarante mille mesures de position

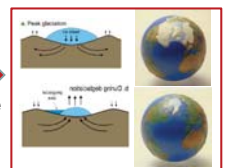
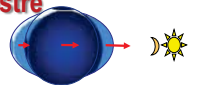
En 2013, précision du positionnement : quelques mm

Facteur de gain : >10 000 depuis la fin des années 1960!

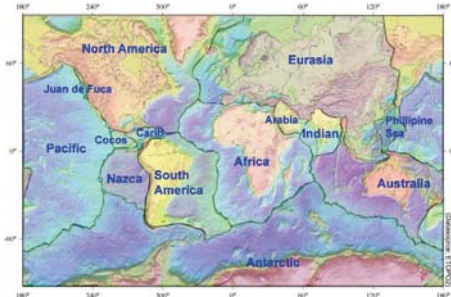
Smithsonian Observatory (E.-U.) a notamment réparti quinze stations de poursuite photographique sur les cinq continents et a réussi à déterminer par rapport à un repère unique la position de ces stations, en rattachant à un ou partiellement totalement de géodésiques entre eux. Les erreurs de position ne dépassent pas 30 mètres, progrès essentiel pas dix ans.

Les déformations du globe terrestre

- **Marées terrestres** (périodiques, 30 cm)
- **Variations de l'aplatissement de la Terre** (séculaire, saisonnier, interannuel)
- **Mouvements horizontaux** → (Tectonique des plaques: séculaire, mm/an → cm/an; déformations zones sismiques actives: mm/an)
- **Mouvements verticaux**
 - Effets de charge (atmosphère, hydrologie, etc.) (saisonniers; interannuels → cm)
 - Séismes, volcanisme, ... (mm à m)
 - Rebond post glaciaire (mm/an)
 - Subsides dues au pompage eau, pétrole

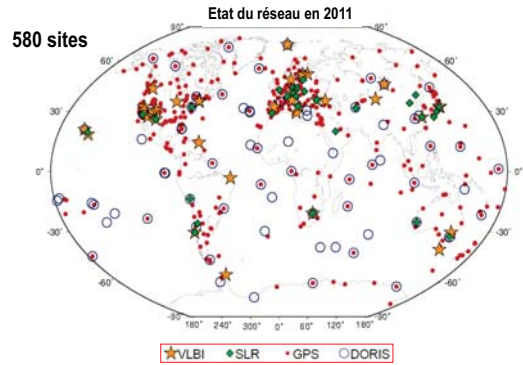


Les plaques tectoniques



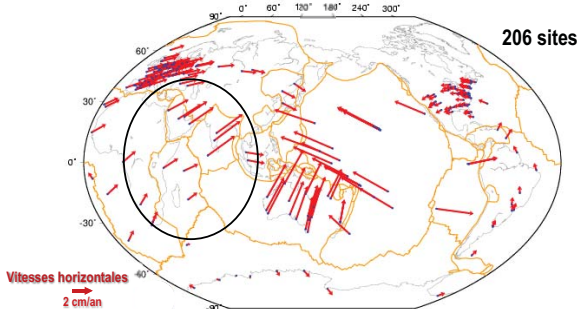
Modèles géologiques → mouvements moyens des plaques des 2-3 derniers millions d'années
 « NUVEL-1 » (De Mets et al., 1990; Argus & Gordon, 1991)
 « MORVEL » (De Mets et al., 2010; Argus et al., 2011)

Réseau des stations géodésiques (Laser, DORIS, GPS, VLBI) → permet de mesurer le mouvement ACTUEL des plaques



Source: Z. Altamimi

Mouvements actuels des plaques par mesure des vitesses horizontales des stations géodésiques Stations situées à l'intérieur des plaques



Les plaques 'Nubie', 'Arabe' et indienne ralentissent...
 ??????????

Altamimi et al., 2012

L'océan observé depuis l'espace



Topex/Poseidon (1992)
 Jason-1 (2001)
 Jason-2 (2008)
 ERS-1/2 (1991/1995)
 Envisat (2002)
 Saral/AltiKa (2013)

Aujourd'hui on mesure la hauteur instantanée de la mer (par rapport à un ellipsoïde de référence) avec une précision de 1 à 2 cm !
 il y a 35 ans, précision: 1 m → facteur 100

Altimétrie spatiale de haute précision

La circulation océanique

L'océan et le climat

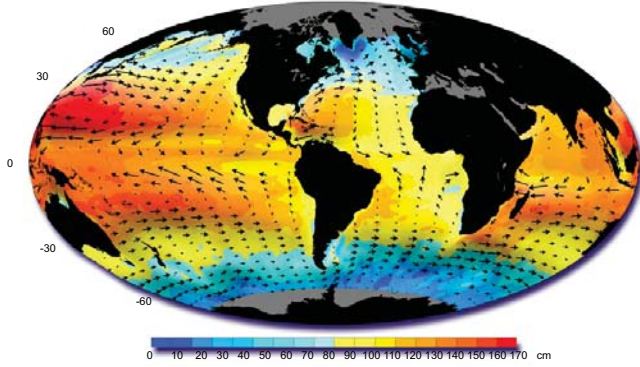
- Principal réservoir de chaleur du système climatique (grande inertie thermique)
- Transporte et redistribue la chaleur sur des échelles de temps beaucoup plus longues que l'atmosphère
- Mémoire à long terme du système climatique

Circulation complexe

- Vents de surface + rotation Terre
- Contrastes de température et de salinité

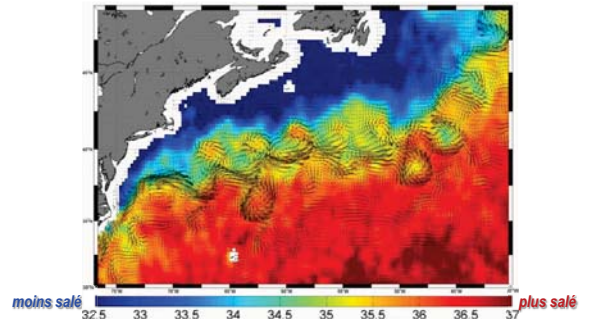
Emissions de gaz à effet de serre dues aux activités humaines → océan = « puits » de dioxyde de carbone

L'altimétrie spatiale permet de mesurer la topographie 'dynamique' de l'océan → circulation géostrophique de surface



Source: CLS/AVISO

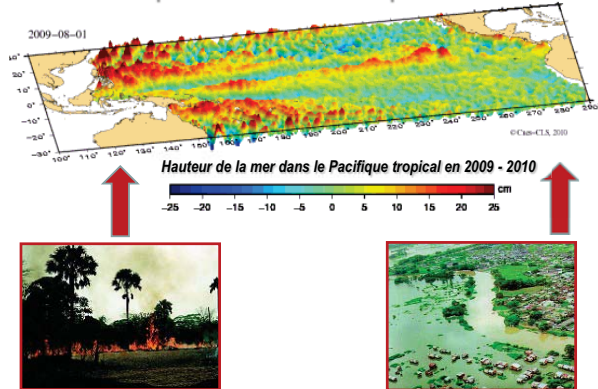
Les méandres du Gulf Stream



Courants d'après l'altimétrie et salinité de l'océan d'après le satellite SMOS

Source: AVISO et ESA

El Nino vu par le satellite altimétrique Jason-2



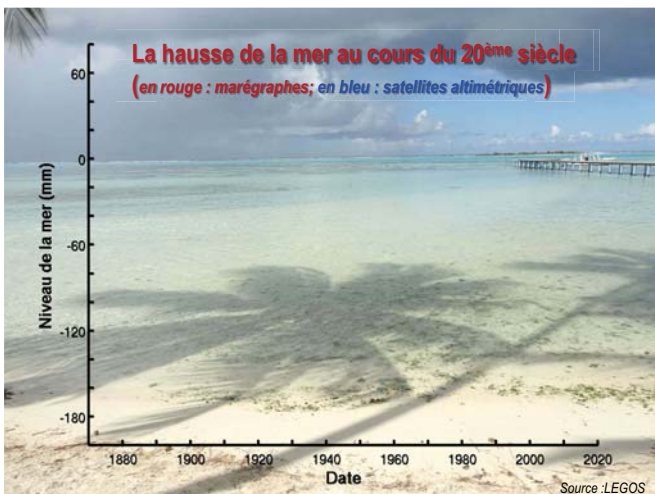
Hauteur de la mer dans le Pacifique tropical en 2009 - 2010

cm



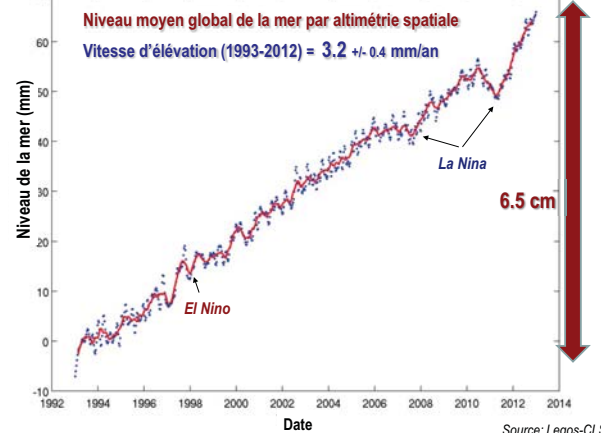
La hausse actuelle du niveau de la mer mesurée par satellite

La hausse de la mer au cours du 20^{ème} siècle
(en rouge : marégraphes; en bleu : satellites altimétriques)



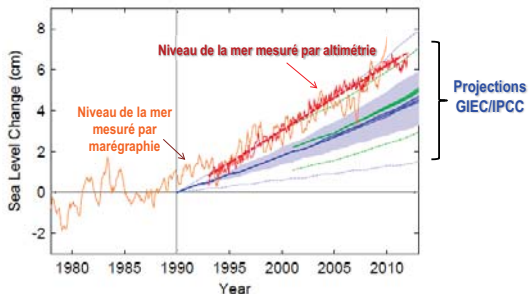
Source :LEGOS

Updated: 14/03/2013



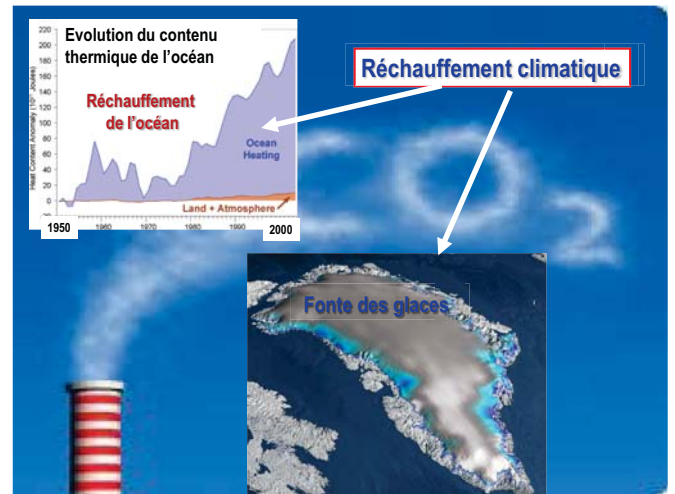
Source: Legos-CLS

Niveau de la mer: comparaison entre observations et estimations des modèles de climat (GIEC/IPCC, 3^{ème} et 4^{ème} rapports)

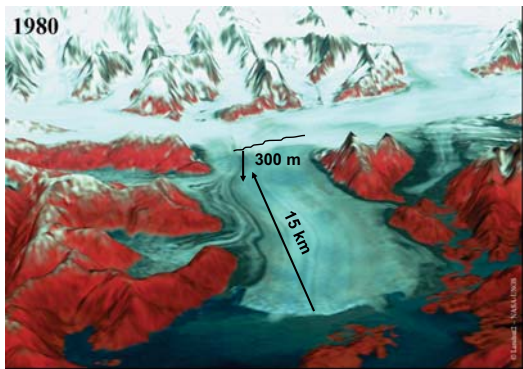


GIEC: Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
 IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change

Rahmstorf, Foster, Cazenave (2012)



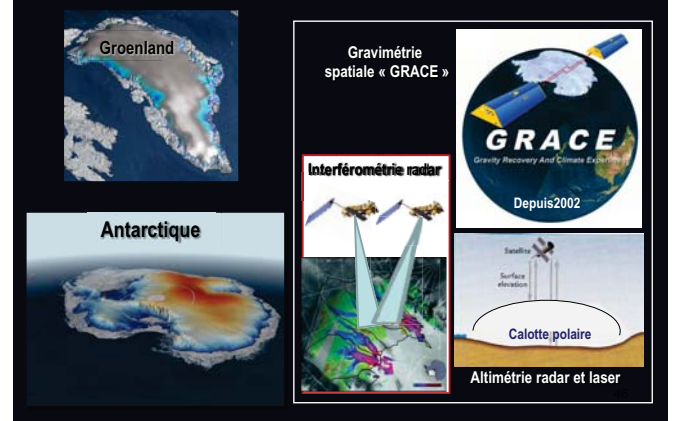
Recul et amincissement des glaciers mesurés par imagerie « satellite »



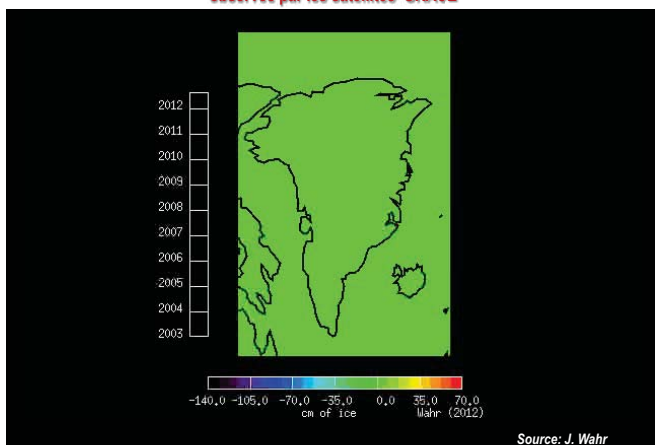
Recul et amincissement du glacier Columbia (Alaska) entre 1980 et 2007

Berthier et al. 2010

Variations de masse des calottes polaires mesurées par satellite depuis 20 ans

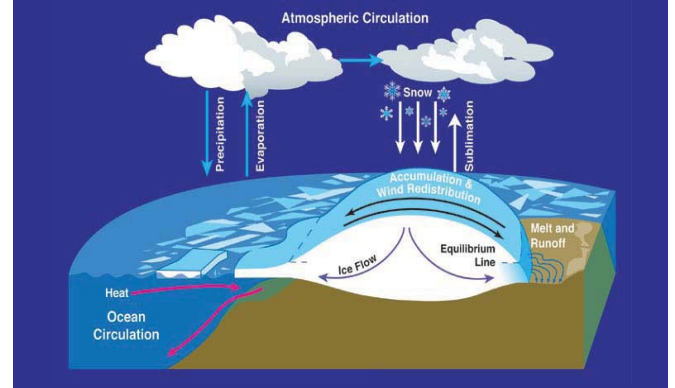


Perte de masse de glace (couleurs bleu-violet-noir) au Groenland entre 2003 et 2012 observée par les satellites GRACE

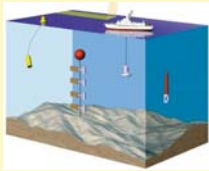


Source: J. Wahr

Variation de masse des calottes polaires = variation de masse en surface (accumulation/ablation) + écoulement des glaciers côtiers dans la mer (effet dynamique)



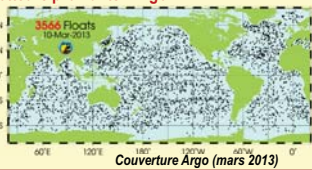
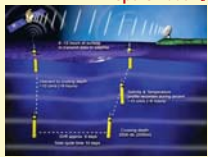
Mesures de température de l'océan jusqu'à 1000-2000m de profondeur (bateaux depuis 1950; Argo depuis 2003)



Principales routes maritimes

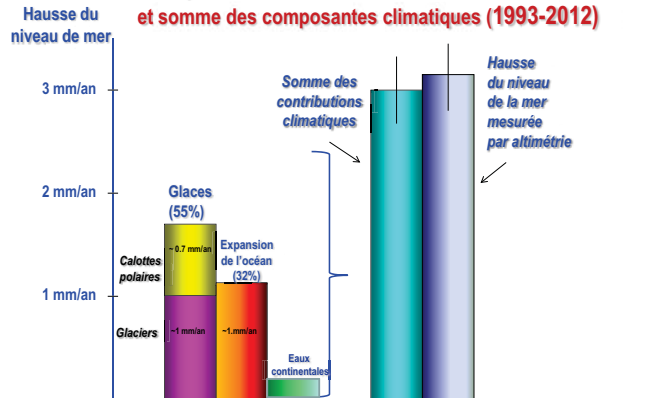


Depuis 2003 → Flotteurs profilants 'Argo'



Couverture Argo (mars 2013)

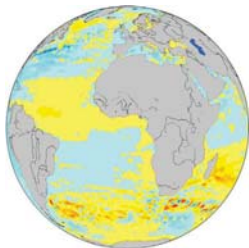
Comparaison entre hausse de la mer observée et somme des composantes climatiques (1993-2012)



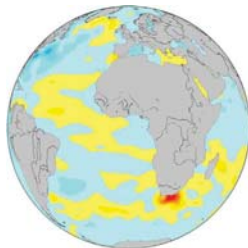
Meysignac & Cazenave 2012
Cazenave & Remy, 2011

La mer ne monte pas de manière uniforme!

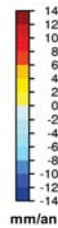
Distribution régionale des vitesses de variation du niveau de la mer (1993-2012) (hausse moyenne globale retirée)



Tendances régionales des variations du niveau de la mer mesurées par altimétrie spatiale

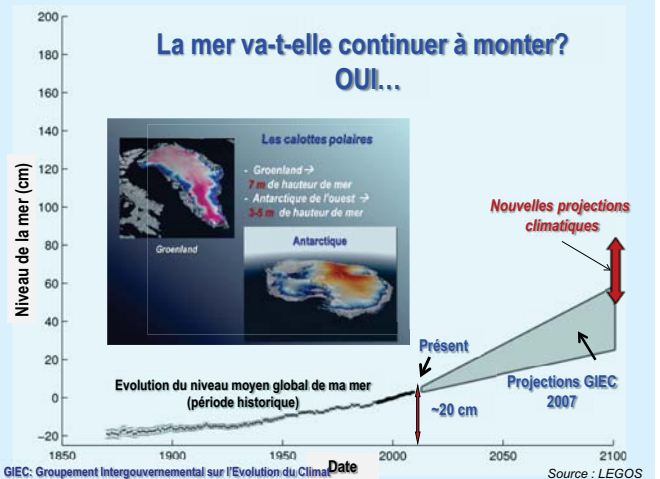


Tendances régionales de l'expansion thermique des océans



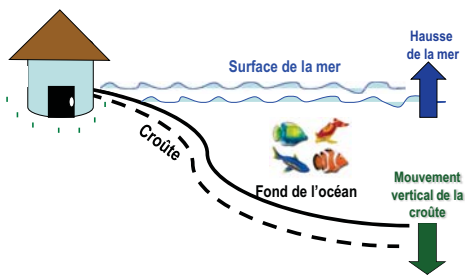
Source: LEGOS

La mer va-t-elle continuer à monter? OUI...



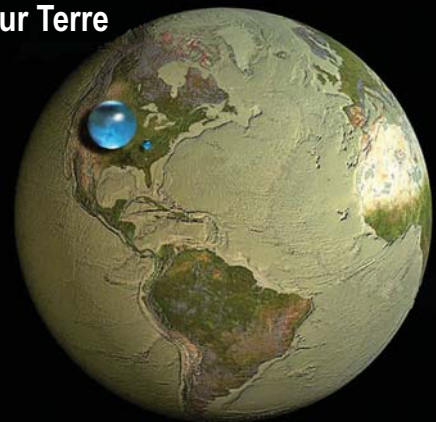
Ce qui compte localement, c'est la variation **TOTALE** du niveau de la mer relativement à la côte →

Somme de la hausse moyenne globale + variabilité régionale + mouvements verticaux de la croûte terrestre !!!



La variabilité régionale et la subsidence du sol amplifient la hausse 'climatique' du niveau de la mer

L'eau sur Terre



Source : USGS



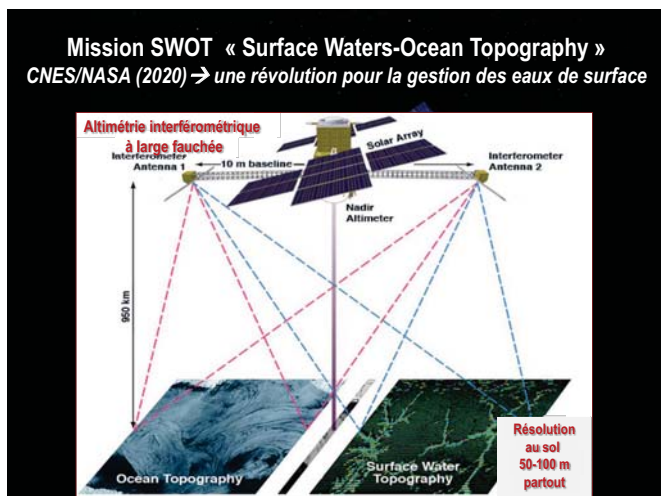
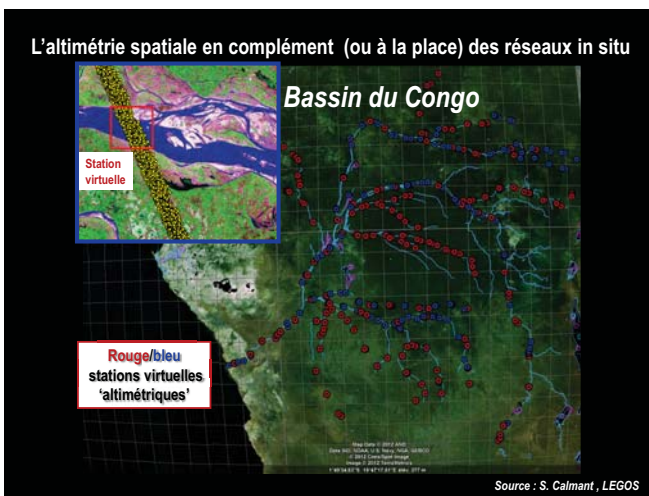
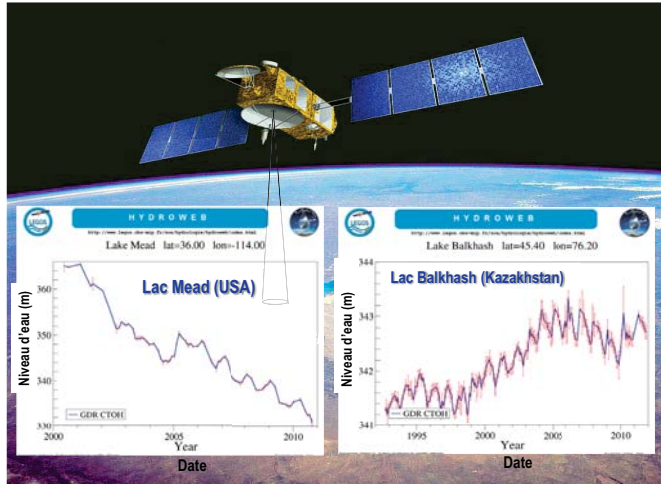
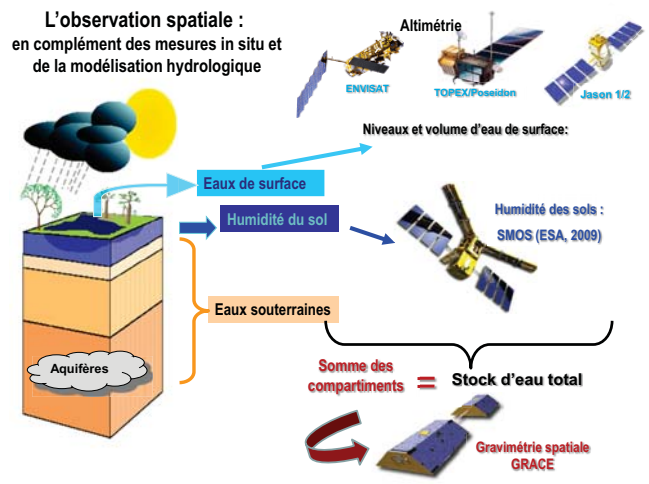
Le Tigre et l'Euphrate



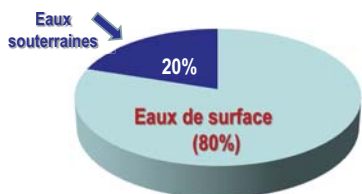
Gestion de l'eau dans les bassins versants

- Ressources en eau
- Agriculture-Irrigation
- Production Energie Hydroélectrique
- Prévion météo et modélisation du climat
- Prévion et gestion des risques: *inondations, sécheresses*
- Navigation
- Aménagement du territoire
- Transports sédimentaires
- Cycle du carbone
- Niveau de la mer

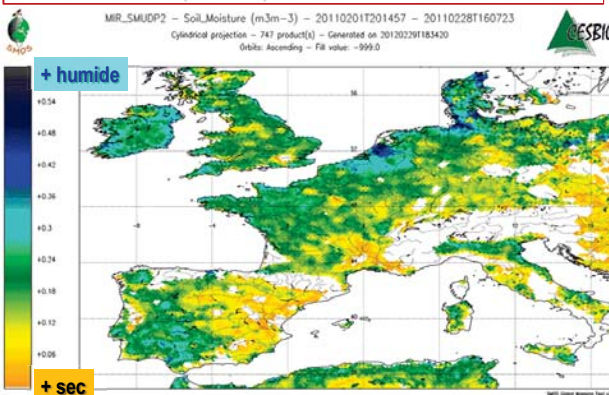
L'observation spatiale : en complément des mesures in situ et de la modélisation hydrologique



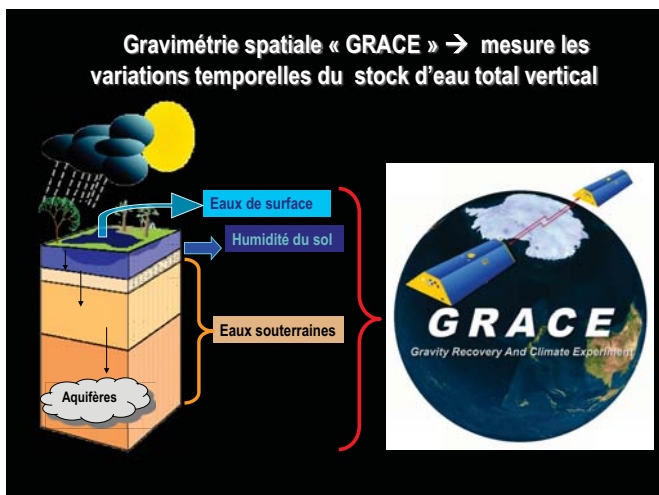
Prélèvements d'eau aux USA en 2005



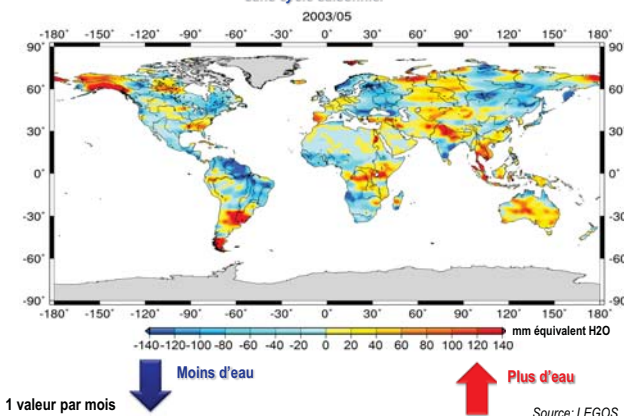
Humidité des sols en Europe mesurée par le satellite SMOS en février 2011 et février 2012



Gravimétrie spatiale « GRACE » → mesure les variations temporelles du stock d'eau total vertical

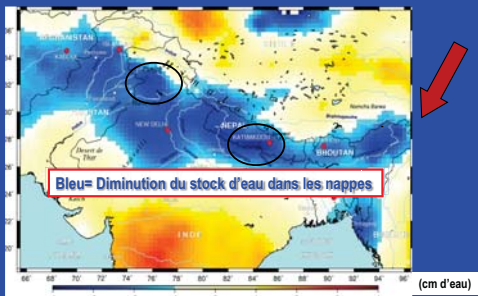


GRACE : Evolution spatio-temporelle du stock d'eau total dans les bassins fluviaux (2003-2012) sans cycle saisonnier



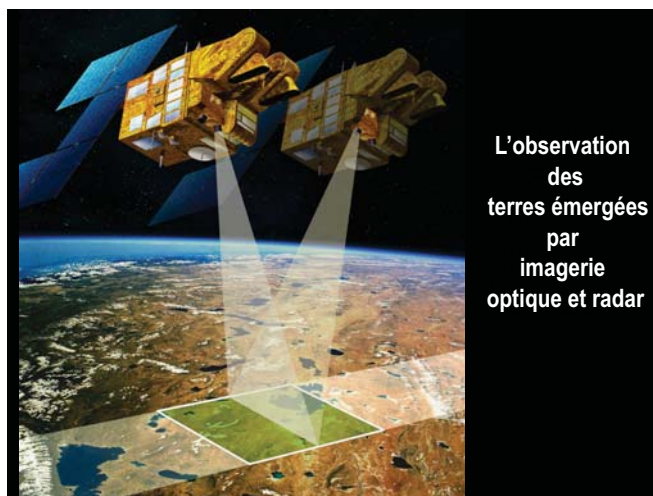
Variations du stock d'eau total mesuré par GRACE moins eaux superficielles = variations eaux souterraines

Diminution du stock d'eau dans les nappes entre 2002 et 2008 mesurée par GRACE

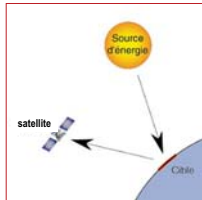


Pompage des eaux souterraines pour l'irrigation des cultures dans les vallées du Gange et de l'Indus

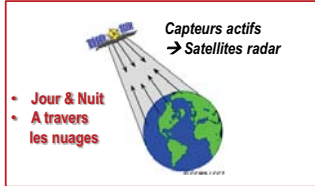
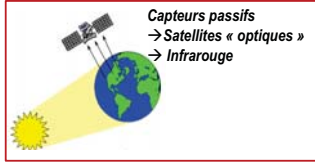
Rodell et al., 2009; Twari & Wahr, 2009



La **télétection spatiale**...c'est l'acquisition à distance d'informations sur des objets de la surface terrestre par analyse du rayonnement électromagnétique qu'ils émettent ou réfléchissent dans différents domaines de fréquences



Résolution au sol : 80 m en 1970
Aujourd'hui : ~ 50 cm
Gain en précision > 100



- Jour & Nuit
- A travers les nuages

Applications de l'imagerie spatiale 'optique' et 'radar'

- **Occupation des sols et évolution, suivi de la végétation**
- **Gestion des forêts** : connaître les surfaces forestières et les peuplements, disposer de plans actualisés de gestion forestière, estimer les dégâts d'intempéries (incendies, tempêtes, ouragans), aménager et surveiller les sites protégés.
- **Agriculture** : classification des types de cultures et de sol, évaluation de la santé des cultures, estimation de la production totale d'une récolte, surveillance de conformité aux lois et traités.
- **Aménagement du territoire** et études urbaines : suivi de l'urbanisation.
- **Surveillance maritime** : contrôle des activités de pêche et du trafic maritime, localisation des nappes de pollution, gestion de l'environnement côtier et océanique.
- **Cartographie** (en particulier aux petites échelles inférieures au 1/100 000).
- **Météorologie**
- **Gestion des ressources en eau**
- **Risques naturels et industriels** : localisation des zones affectées et cartographie des dégâts
- **Sciences de la Terre** : glaciologie, géologie et volcanologie
- **Archéologie**
- **Surveillance du territoire, Défense et renseignement.**

Carte d'occupation des sols par imagerie optique:

Exemple: « Corine* Land Cover »
*CORINE = Coordination de l'Information sur l'Environnement
→ Initiative de l'Union Européenne
→ Vision européenne homogène
→ Outil d'aide à la décision

Mesure radiométrique (réflectance)
→ Indices variés
→ ex: indice de végétation = différence de réflectance dans IR et rouge
Si proche de 1 → végétation à forte concentration en chlorophylle

Interprétation des images (classification) → Cartes d'occupation des sols

<p>1. Artificial surfaces</p> <p>1.1 Urban fabric</p> <p>1.2 Industrial, commercial and transport units</p> <p>1.3 Roads and rail networks and associated land</p> <p>1.4 Ports</p> <p>1.5 Airports</p> <p>1.6 Area, along and semi-enclosed water bodies</p> <p>1.7 Linear features and infrastructure</p> <p>1.8 Dunes, dunes, and wetlands</p> <p>1.9 Construction sites</p> <p>1.4 Artificial, non-agricultural vegetated areas</p> <p>1.4.1 Grass and other areas</p> <p>1.4.2 Small and large herbaceous</p>	<p>3. Forest and semi-natural areas</p> <p>3.1 Forests</p> <p>3.2 Shrub and/or herbaceous vegetation associations</p> <p>3.3 Open spaces with little or no vegetation</p> <p>3.3.1 Scrub, dunes, and wetlands</p> <p>3.3.2 New trees</p> <p>3.3.3 Non-forest registered areas</p> <p>3.3.4 Other areas</p> <p>3.3.5 Open and natural areas</p>
<p>2. Agricultural areas</p> <p>2.1 Arable land</p> <p>2.2 Permanent crops</p> <p>2.3 Pastures</p> <p>2.4 Heterogeneous agricultural areas</p> <p>2.4.1 Mixed crops associated with permanent crops</p> <p>2.4.2 Pastures</p> <p>2.4.3 Agriculture</p> <p>2.4.4 Agro-forestry areas</p>	<p>4. Wetlands</p> <p>4.1 Inland wetlands</p> <p>4.2 Coastal wetlands</p> <p>4.2.1 Salt marshes</p> <p>4.2.2 Salines</p> <p>4.2.3 Hardly flat</p> <p>4.2.4 Other flats</p>
<p>5. Water bodies</p> <p>5.1 Inland waters</p> <p>5.1.1 Water courses</p> <p>5.1.2 Water bodies</p> <p>5.2 Marine waters</p> <p>5.2.1 Coastal lagoons</p> <p>5.2.2 Estuaries</p> <p>5.2.3 Sea and oceans</p>	<p>Zones urbanisées</p> <p>Forêts</p> <p>Prairies</p> <p>Régions agricoles</p> <p>Zones cultivées</p> <p>Pâturages</p> <p>Zones inondées</p>

Carte de la végétation en Europe (moyenne de 8 années d'observations) (Instrument SPOT/Végétation)



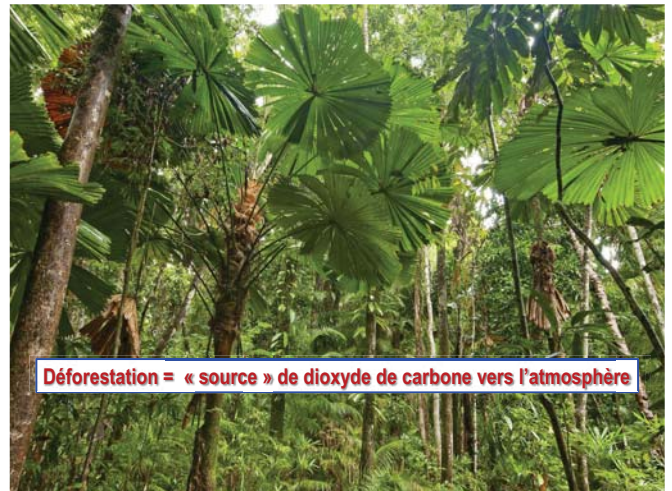
Images de la déforestation au Brésil entre 2000 et 2010



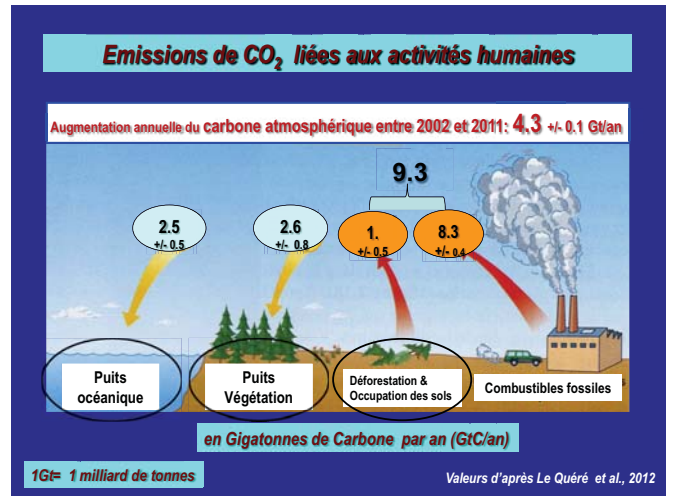
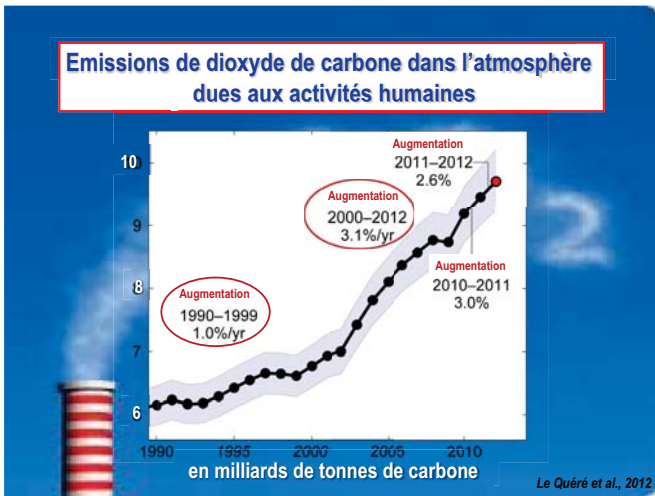
1 image par année

Instrument MODIS sur le satellite « Terra »

Source: NASA



Déforestation = « source » de dioxyde de carbone vers l'atmosphère



Mission européenne « BIOMASS » : mesure par technique radar de la biomasse de la végétation (forêts)
 → rôle de la végétation dans le cycle du carbone anthropique



Applications de la télédétection à l'agriculture de précision

Imagerie satellitaire (+GPS)
 → Informations permettant d'améliorer et d'optimiser les rendements agricoles
 → Planification de la production agricole

→ Échelle locale, régionale, nationale

Farmstar

D. KELLER, BEA...

Source : G. Denis, Astrium

Mois	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet
Protection des plantes					Estimation risques piédon versé et fongicide au semis		Actualisation risque piédon versé	Conseil et date de traitement fongicide		
Etat des cultures					Bilan de croissance à recullement		Reactualisation du potentiel de rendement			

Interprétation des images à des étapes clés de la croissance des plantes permet de connaître l'état de la plante
 → teneur en chlorophylle, stress hydrique, surface foliaire, maladies...
 • Prévision des récoltes
 • Remèdes
 → irrigation, fertilisation, etc.

Télédétection spatiale → paramètres biophysiques des plantes

Bilan de campagne

Parcelles agricoles observées par satellite optique dans le bassin de la Seine

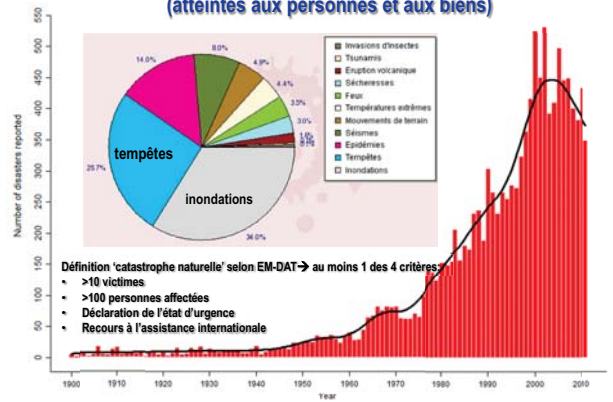


Source: G. Denis, Astrium « Farmstar »



Les catastrophes majeures

Nombre de catastrophes naturelles pour la période 1900-2011 (atteintes aux personnes et aux biens)



Définition 'catastrophe naturelle' selon EM-DAT → au moins 1 des 4 critères

- >10 victimes
- >100 personnes affectées
- Déclaration de l'état d'urgence
- Recours à l'assistance internationale

EM-DAT : International Disaster database

2000: création de la Charte Internationale « Espace et Catastrophes Majeures »



- La Charte est une coopération internationale entre agences spatiales mettant à disposition leurs satellites pour cartographier les régions dévastées
- Son but est de contribuer à l'organisation des opérations de secours en fournissant des cartes (1) de référence (avant la crise) et (2) des dégâts, des regroupements de survivants, des zones accessibles, etc. (pendant la crise)
- La Charte est déclenchée immédiatement après une catastrophe, lorsque les opérations d'alerte, d'urgence ou de secours se mettent en place
- Elle offre aux utilisateurs concernés par les catastrophes (sécurité civile, Nations Unies) un système spatial unifié et coordonné d'acquisition et d'interprétation d'images 'satellites'



La constellation de satellites imageurs utilisés par la Charte depuis 2000



Aujourd'hui: images de résolution 50 cm (ex. satellites Pleiades) → crucial pour l'organisation rapide et efficace des secours sur le terrain

International Charter 'Space and Major Disasters' Source: C. Proy, H. de Boisseson, CNES

Activations de la Charte par région et par type de catastrophe (368 activations entre 2000 et 2013)



Exemples d'activations récentes de la charte





Ouragan Sandy, Haïti, octobre 2012

- Activation le 29 octobre
- Images des satellites:
Pléiades, Radarsat, SPOT, Worldview, DMC
- Cartes des impacts produites par:
- UNOSAT
- SERTIT



Source : C. Proy, H. de Boissezon, CNES International C.

Image Pléiades 1A - 02 novembre 2012

