

# Produits de prévision des Tempêtes de Poussière et de Sable: Mali

Ernest Werner, AEMET  
Gerardo García-Castrillo, AEMET  
WMO Barcelona Dust Regional Center

Atelier SDS-WAS Afrique CREWS  
Online, 3 Avril 2025



# Outline

- 1 **Introduction: SDS-WAS**
- 2 **Sources de poussières minérales**
- 3 **Cycle de la poussière**
- 4 **Modèle opérationnel: MONARCH**
- 5 **Produits multimodèle**
- 6 **Système d'alerte de tempêtes de poussière et sable**
- 7 **Links**



# Outline

- 1 **Introduction: SDS-WAS**
- 2 Sources de poussières minérales
- 3 Cycle de la poussière
- 4 Modèle opérationnel: MONARCH
- 5 Produits multimodèle
- 6 Système d'alerte de tempêtes de poussière et sable
- 7 Links

## WMO SDS-WAS

### WMO SDS-WAS: Contexte et objectifs

- Sand and Dust Storm Warning Advisory and Assessment System (2004-2007)
- Système d'avertissement et d'évaluation des tempêtes de sable et de poussière
- Amélioration de l'observation et de la prévision des tempêtes de sable et de poussière
- Diffusion des connaissances et des produits
- Impacts sur la santé, transport, énergie solaire, climatologie, météorologie,...
- Centres régionaux: Pékin (Asie 2008), Barcelone (NAMEE 2010), Barbados (Amérique 2016-2017), Jeddah (GCC 2023)



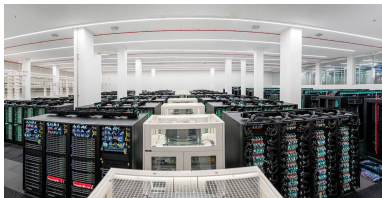
WORLD  
METEOROLOGICAL  
ORGANIZATION



**GAW**

## Barcelona Dust Regional Center: centre opérationnel

- Barcelona Dust Forecast Center (RSMC-ASDF 2014)
- Centre météorologique régional spécialisé pour les prévisions de sable et de poussière atmosphériques
- Barcelona Dust Regional Center (2022) → Nouvelle page web!
- AEMET & BSC (Barcelona Supercomputing Center)
- Pékin: deuxième centre opérationnel 2017



Marenostrum 5: BSC



Cirrus-Atos: AEMET

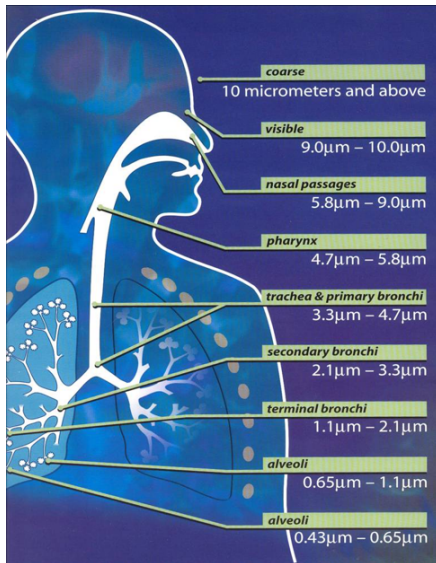


## Impacts: Local & Global

- Météorologie
- Climatologie
- Transport
- Qualité de l'air & Santé
- Énergie solaire
- Agriculture
- Écosystèmes



# Impacts sur la santé



## Particules > PM10

- Irritations cutanées
- Conjonctivite, infections oculaires

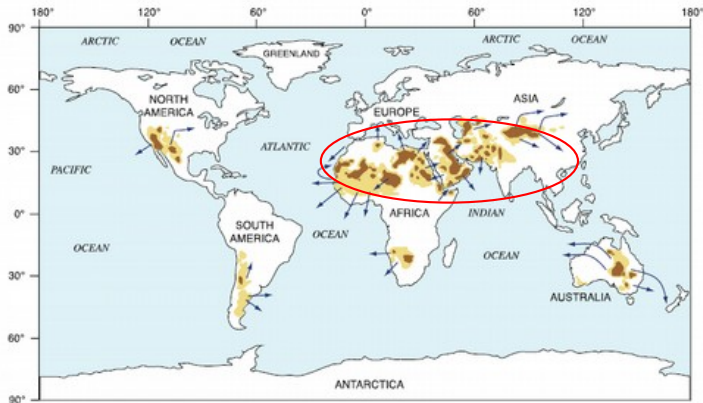
## Particules < PM10 (respirables)

- Rhinite allergique
- Irritation aux muqueuses
- Trachéite & Bronchite
- Emphysème & Pneumonie
- Silicose (poumon du désert)
- Fièvre de la Vallée
- **Méningite** → **Sahel**
- Maladies cardio-vasculaires

# Outline

- 1 Introduction: SDS-WAS
- 2 Sources de poussières minérales**
- 3 Cycle de la poussière
- 4 Modèle opérationnel: MONARCH
- 5 Produits multimodèle
- 6 Système d'alerte de tempêtes de poussière et sable
- 7 Links

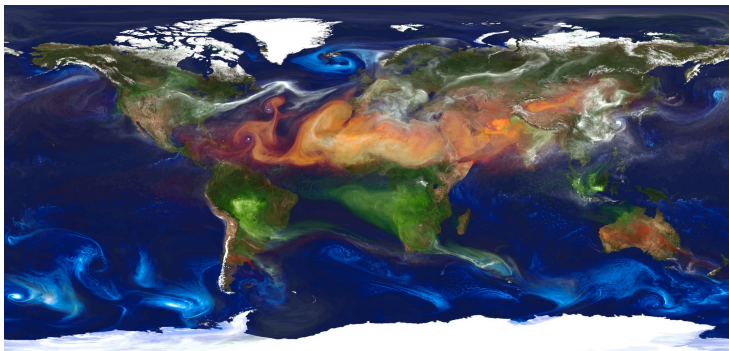
## Principales sources de poussières minérales



Source: Muhs and others, 2014

- **Ceinture de poussière (Dust Belt):** Afrique du Nord, Moyen-Orient et Asie occidentale
- **Autres sources :** Amérique, Afrique du Sud, Australie

# Distribution géographique de la poussière: problème global ou local ?



**GEOS 5:** Modèle atmosphérique global avec assimilation de données

**Orange:** Poussière minérale

**Blue:** sel marin

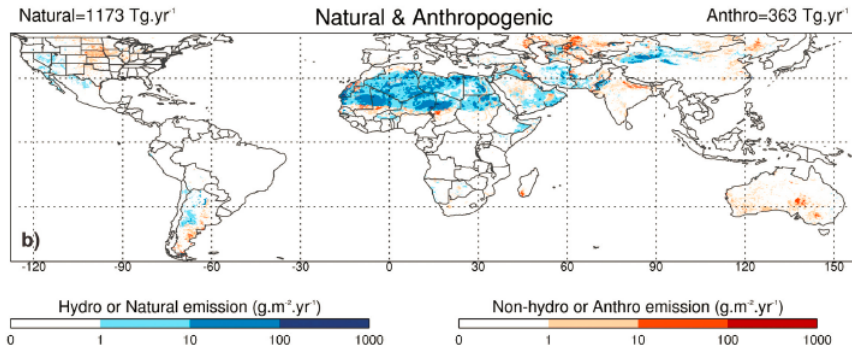
**Green:** combustion de la biomasse

**White:** Sulfates





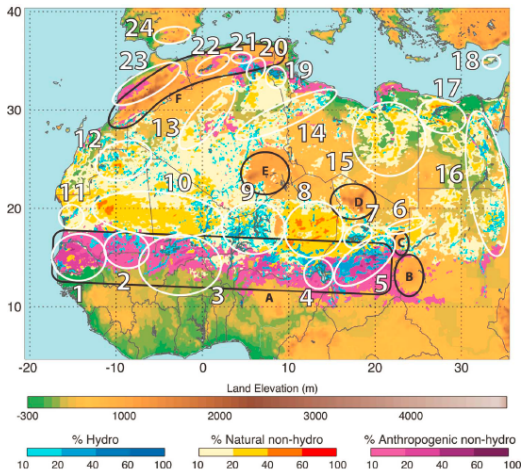
# Sources de poussière: Anthropiques & Naturelles (25 % vs 75 %)



Source: Paul Ginoux et al, 2012

Satellites polaires Terra/Aqua, MODIS Deep Blue Level 2

## Sources de poussière moitié nord de l'Afrique: Anthropiques & Naturelles



Source: Paul Ginoux et al, 2012

Données: MODIS Deep Blue Level 2

...

- 7, Bodélé depression
- 8, Grand Erg of Bilma
- 9, Basin of the Aïr
- 10, Erg El Djouf
- 12, Tiris Zemmour region
- 13, Grand Erg Occidental
- 14, Grand Erg Oriental
- 15, Libyan Desert
- A, the Sahel
- B, the Ouaddaï Highlands
- C, Ennedi
- D, Tibesti
- E, Ahaggar
- F, Atlas Mountains

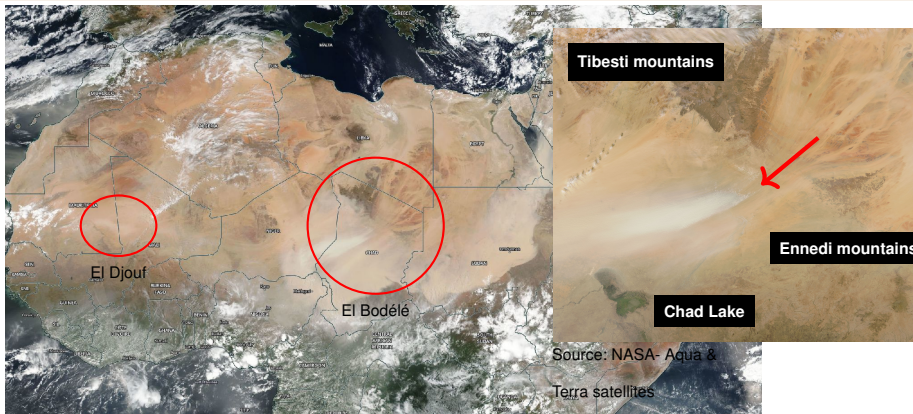
**Carte de source active de  
poussière → MONARCH**

## UN Reports

- Sand and Dust Storms Compendium - UNCCD 2022
- Global Assessment of SDS - UNEP 2016
- Émissions mondiales annuelles de poussière: 1536 Tg yr-1
- ~ 3000 ULCC or 154 pyramides de Gizeh
- 25 % sources anthropiques (principalement agriculture)
- 75 % provenant de sources de poussière naturelles
- L'Afrique du Nord contribue à plus de la moitié des émissions mondiales de poussière
- Le Sahara est la source naturelle la plus importante
- Les émissions de poussières du Sahel sont liées à l'utilisation des terres : agriculture

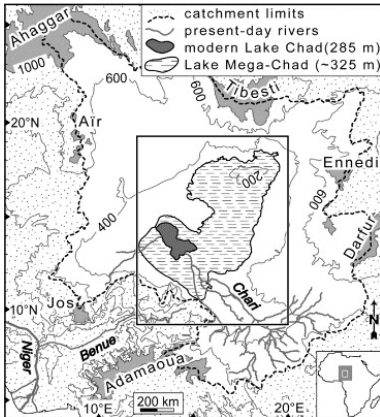


## Dépression du Bodélé, el Djouf & l'Amazonie (Ilan Koren et al 2006)



- Bodélé: la plus grande source ponctuelle → 0.7 Tg/jour (hivern)
- 40 Tg/yr du Sahara à l'Amazonie → La moitié du Bodélé
- Link: Prospero et al. 2020 → MERRA → 8 - 10 Tg/yr !!
- **El Djouf**: source majeure que le Bodélé! Link: Yu et al, 2020)

## Bodélé et Lac Mega-Chad



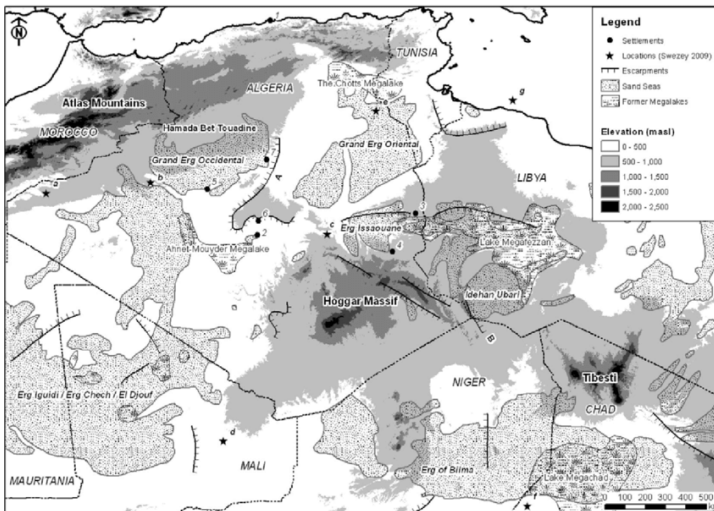
Holocène Lac Méga-Chad Shuster et al.



Source: US Geological Survey

### Dust as a tipping element: The Bodélé Depression, Washington et al, 2009

- Holocène Lac Méga-Chad: 350,000 km<sup>2</sup>
- Diatomées → Silice
- rempli/vidé 3 à 4 fois au cours des 3000 à 4000 dernières années
- Jet de basse altitude (LLJ): vitesse maximale at 200 m altitude
- maximum à 11 h en SFC



Simplified regional geomorphology of the Sahara (adapted from Mainguet 1983; Drake & Bristow 2006). Locations referred to in the text: 1, Algiers; 2, In Salah; 3, In Amenas; 4, Illizi; 5, Timimoun; 6, Ain al Hadjaj; 7, El Golea. Locations for the stratigraphic sections shown on Figure 2: a, Tindouf-Ouarzazt; b, Saoura Basin; c, Tademaït, Algeria; d, Taoudenni Basin; e, Chotts Basin; f, North Chad; g, offshore NW Libya.

Source: Observations on the impact of climate change on landform behaviour and geohazards in the Algerian Sahara, E. M. Lee et al, 2013

# Situations synoptiques

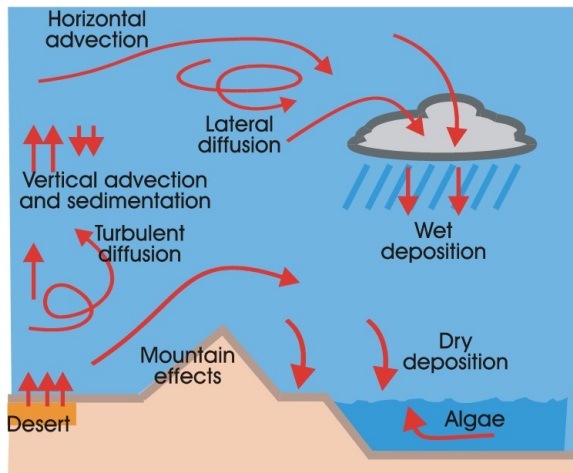
Source: Sahel dust zone and synoptic background, Klose et al, 2020 ([link](#))

# Outline

- 1 Introduction: SDS-WAS
- 2 Sources de poussières minérales
- 3 Cycle de la poussière**
- 4 Modèle opérationnel: MONARCH
- 5 Produits multimodèle
- 6 Système d'alerte de tempêtes de poussière et sable
- 7 Links



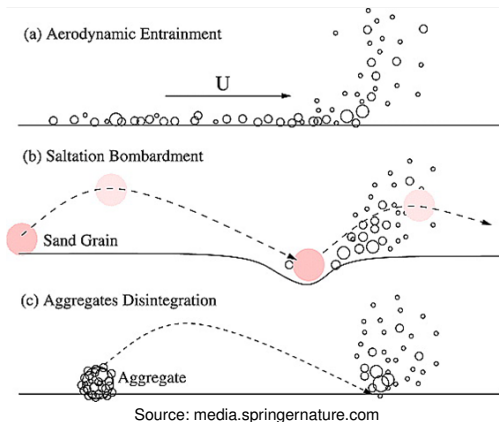
# Cycle de la poussière



Source: Barcelona Dust Forecast Center

- Émission
- Mouvement vertical
- Transport
- Dépôt humide & Sec

# Émission: Saltation & Sandblasting



- Suspension directe → force de cohésion → vent fort
- Le moyen le plus efficace d'émission de poussière → **saltation** (flux horizontal) et **sandblasting** (flux vertical) →  $V^3$

## Émission: Le seuil d'érosion dépend de l'état du sol



Dry session



croûte du sol



Saison des pluies → Sol inondé

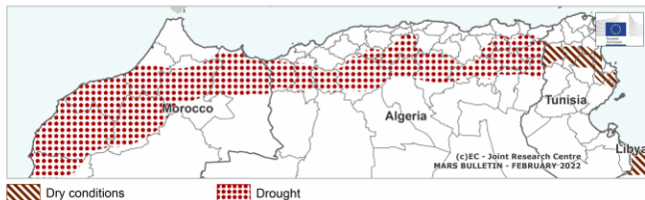


couverture neigeuse

# Émission: Le seuil d'érosion dépend de l'état du sol

## AREAS OF CONCERN - EXTREME WEATHER EVENTS

Based on observed data from 01 December 2021 until 10 February 2022

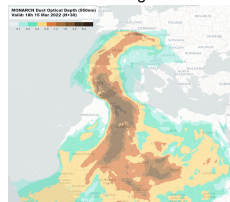


Source: JRC MARS Bulletin

### Interannual Time Series



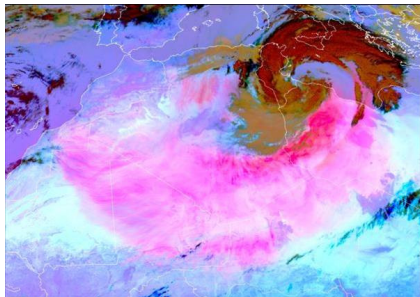
### EVI: Enhanced Vegetation Index



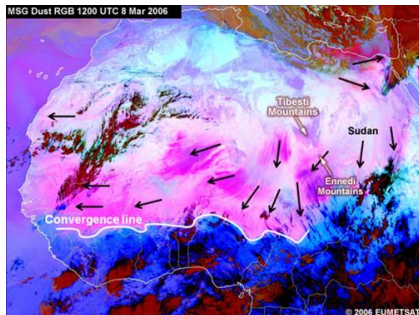
# Facteurs météorologiques

## Phénomènes synoptiques et méso-alpha

- Vents du système frontal
- Alizés-Harmattan



RGB images: **Magenta** →  
Poussière



# Facteurs météorologiques

## Phénomènes méso-gamma et micro-échelle

- Vents orographiques
- Convection : Haboob et Dust devils



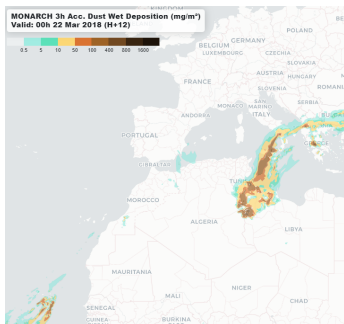
Source & link to the video: DVArchive

# Transport de poussière

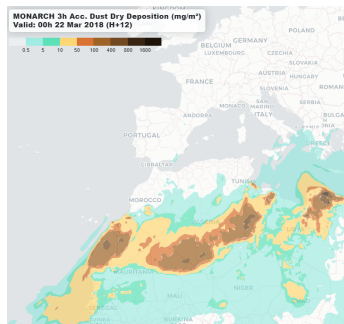
- Modifications de la composition chimique
- Augmentation de la capacité à agir comme noyau de condensation
- Augmentation de la solubilité du Fe

Source: The Godzilla Dust Event as seen by SEVIRI, Qian Tan et al.

## Dépôt humide (pluie) & Sec (force gravitationnelle)



Source: Alfons Puertas. Observatori Fabra



Source: Michael Freeman. Khartoum Haboob



# Outline

- 1 Introduction: SDS-WAS
- 2 Sources de poussières minérales
- 3 Cycle de la poussière
- 4 Modèle opérationnel: MONARCH**
- 5 Produits multimodèle
- 6 Système d'alerte de tempêtes de poussière et sable
- 7 Links

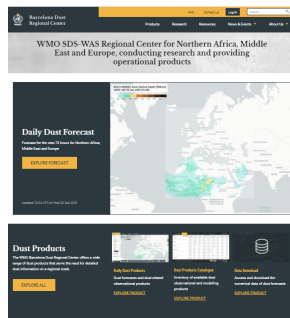
## Modèle opérationnel: MONARCH (<https://dust.aemet.es>)

### Multiscale Online Nonhydrostatic AtmospheRe CHemistry

- Exécution: Tous les jours à 12 UTC, 84 h prévision, 3 h intervalle
- Résolution:  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$
- Domaine: Afrique du Nord, Moyen-Orient et Europe (NAMEE)

### Variables

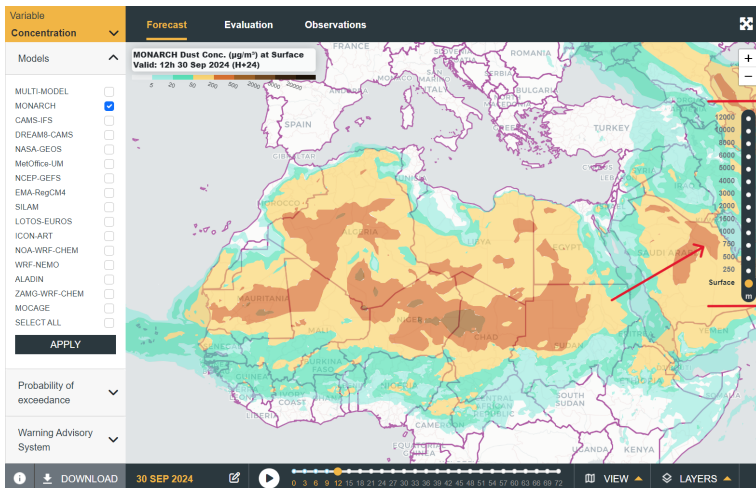
- **Concentration de poussière en surface** [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]
- Extinction [ $\text{M}/\text{m}$ ]
- Charge de poussière [ $\text{g}/\text{m}^2$ ]
- **Épaisseur optique des poussières (Dust AOD) [-]**
- Dépôt sec [ $\text{mg}/\text{m}^2$ ]
- Dépôt humide [ $\text{mg}/\text{m}^2$ ]



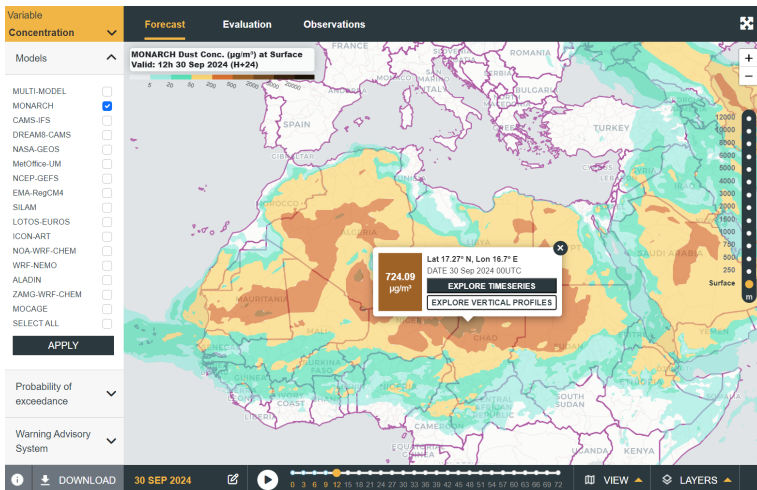
# MONARCH: Concentration en surface & Épaisseur optique AOD

- Impacts de la poussière à la surface
- Stations de la qualité de l'air  
→ PM10
- Dust AOD [–] → quantité totale de poussière dans l'atmosphère
- Propriétés optiques → Satellite AOD, AERONET

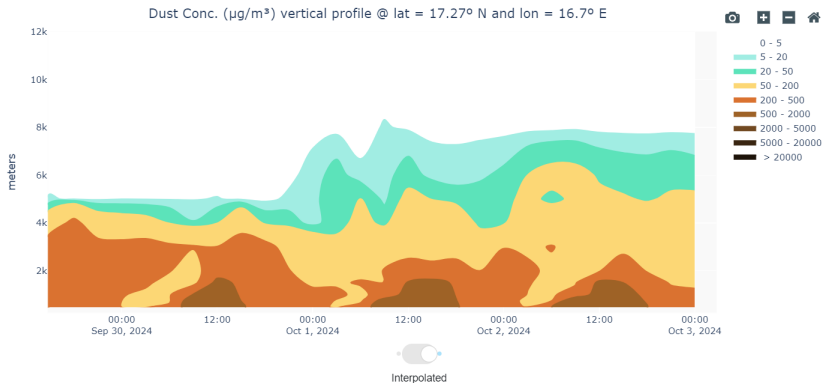
# MONARCH: Concentration en altitude et profils verticales



# MONARCH: Concentration en altitude et profils verticales



# MONARCH: Concentration en altitude et profils verticales

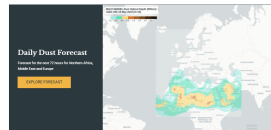


# Outline

- 1 Introduction: SDS-WAS
- 2 Sources de poussières minérales
- 3 Cycle de la poussière
- 4 Modèle opérationnel: MONARCH
- 5 Produits multimodèle**
- 6 Systeme d'alerte de têtes de poussière et sable
- 7 Links

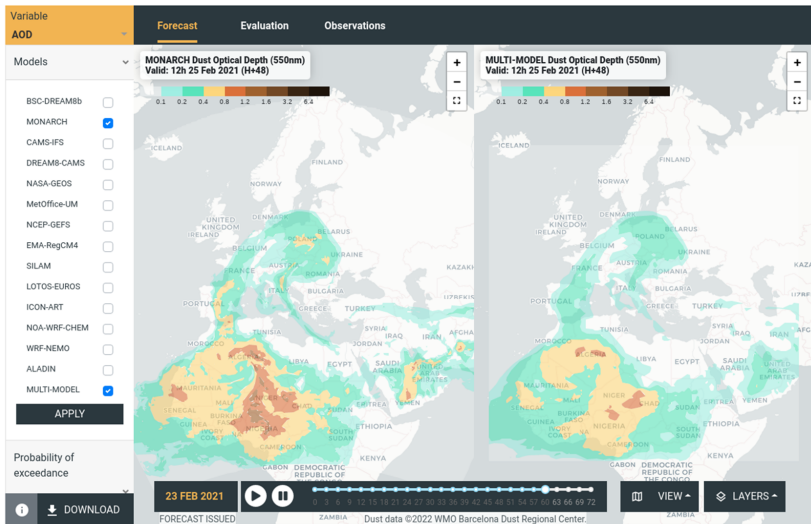
## Multimodèle (15 modèles) (Link: Technical report multimodel)

Model	Institution	Domain	Data Assimilation
BSC-DREAM8b_c2 (End 2022)	BSC-CNS 	Regional	NO
CAMS-ECMWF	ECMWF 	Global	MODIS-AOD
DREAM8-NMME-CAMS	SEEVCCC 	Regional	ECMWF dust-analysis
NMMB/MONARCH	BSC-CNS 	Regional	NO
MetUM	Met Office 	Global	MODIS/Aqua
GEOS-5	NASA 	Global	MODIS
GEFS	NCEP 	Global	NO
EMA REG CM4	EMA 	Regional	NO
NOA-WRF-CHEM	NOA 	Regional	NO
WRF-NEMO	NOA 	Regional	NO
SILAM	FMI 	Global	NO
LOTOS-EUROS	TNO 	Regional	NO
ALADIN-DUST	ONM-Algeria  ALADIN Consortium	Regional	NO
ICON-ART	DWD 	Regional/Global	NO
ZAMG-WRF-CHEM	ZAMG 	Regional	NO
MOCAGE	MétéoFrance 	Global	MODIS and VIIRS

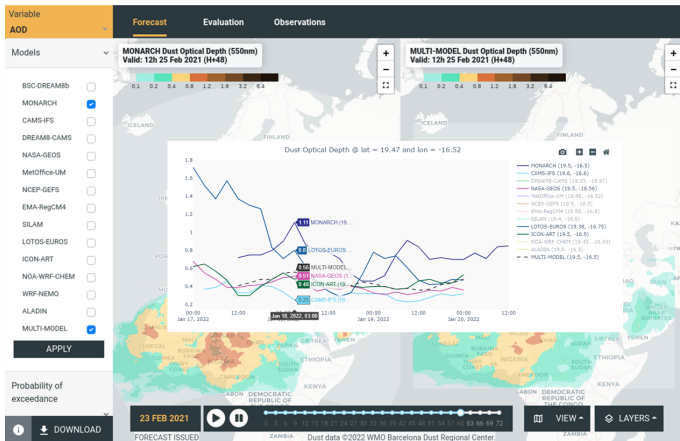




# Comparaison des modèles et MULTIMODEL (médiane)



# Comparaison des modèles et MULTIMODEL (médiane)



● série temporelle des modèles

## Système de prévision d'ensemble multimodèle

### Variables

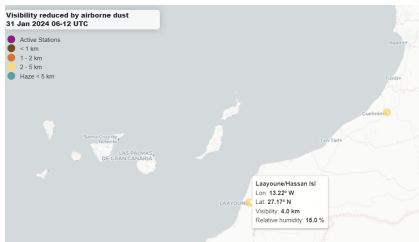
- Concentration de poussière en surface
- Épaisseur optique (AOD) de poussière

### Objectives

- Les prévisions d'ensemble consistent en les calculs de modèles individuels (membre de l'ensemble)
- Condense toutes les prévisions dans un produit plus simple
- Probabilité objective de la situation météorologique

## Cartes de probabilité

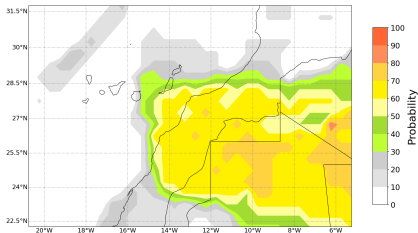
# Cartes de probabilité: Exemple Visibilité



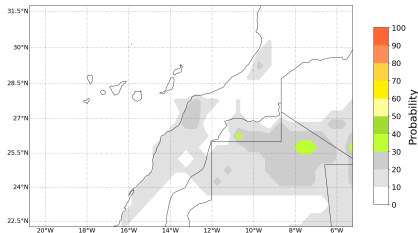
## Eq Visibilité-Concentration (d'Almeida et Izaña)

VIS [m]	DA Eq [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]	IZO Eq [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]
10000	189	141
<b>8000</b>	219	180
5000	301	302
<b>3000</b>	429	529
1500	699	1135
<b>1000</b>	933	1772
500	1535	3800

Probability of Visibility below **5000 m**  
ENS members: **8** Run: 30/01/24 Valid for: **00 – 09 UTC 31/01/24**



Probability of Visibility below **1000 m**  
ENS members: **8** Run: 30/01/24 Valid for: **00 – 09 UTC 31/01/24**



# Outline

- 1 Introduction: SDS-WAS
- 2 Sources de poussières minérales
- 3 Cycle de la poussière
- 4 Modèle opérationnel: MONARCH
- 5 Produits multimodèle
- 6 Système d'alerte de tempêtes de poussière et sable**
- 7 Links

# MAC-CLIMA INTERREG & CREWS



**MACCLIMA**

**Interreg** 



**MAC 2014-2020**  
Coopération Territoriale



## MAC-CLIMA INTERREG

- MAC: Madeira, Açores, Canarias
- Sénégal, Cabo Verde, Mauritanie

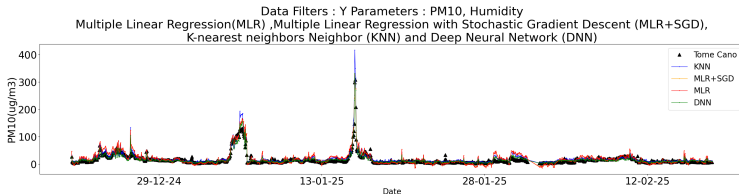
## CREWS - OMM

- Climate Risk and Early Warning Systems
- Burkina Faso (2018) → Chad, Mali, Niger

## Actions proposées (2020-2025)

- Expansion du système d'alerte de Burkina Faso
- Ateliers de formation en ligne
- Installation de compteurs PM & Calitoo → Évaluation du système d'alerte

# MAC-CLIMA INTERREG & CREWS

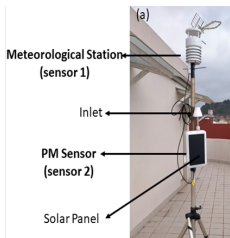


ID 1362  
Counts 1362  
Pearson 0.94  
R2 score 0.77  
BIAS 3.67  
MSE 108.24  
RMSE 10.4  
MAE 5.87  
MAPE 45.85 %  
Pm10 = 0.76KNN+1.41

ID 1362  
Counts 1362  
Pearson 0.93  
R2 score 0.74  
BIAS 3.04  
MSE 120.83  
RMSE 10.99  
MAE 7.45  
MAPE 61.5 %  
Pm10 = 0.75MLR+SGD+2.16

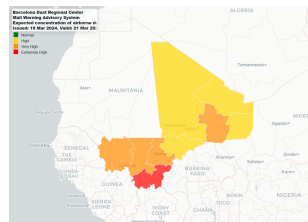
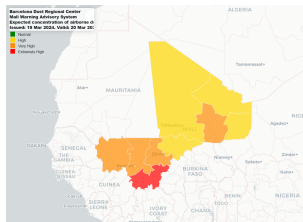
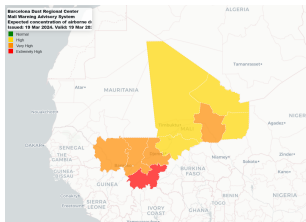
ID 1362  
Counts 1362  
Pearson 0.93  
R2 score 0.73  
BIAS 2.84  
MSE 127.46  
RMSE 11.29  
MAE 7.67  
MAPE 64.3 %  
Pm10 = -0.49HR+3.64MLR+20.24

ID 1362  
Counts 1362  
Pearson 0.95  
R2 score 0.88  
BIAS -0.29  
MSE 54.58  
RMSE 7.39  
MAE 4.45  
MAPE 30.47 %  
Pm10 = 0.9DNN+1.94





# WAS: Carte d'alertes



- Alerte pour trois jours
- Une couleur pour chaque province
- **Vert**: Concentration Normale
- Jaune**: Élevée
- Orange**: Très Élevée
- Rouge**: Extrême



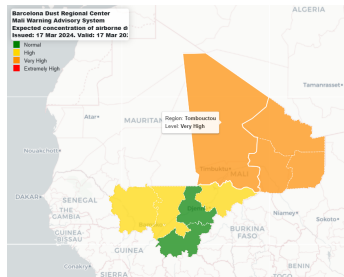
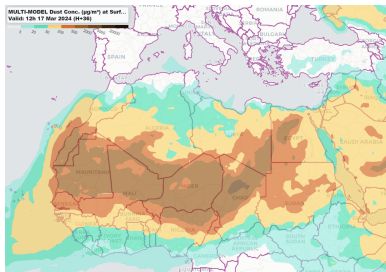
## Niger: seuils d'alerte [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ]

Couleur / Percentile	GAO N	Kayes	Kidal N	Koulikoro	Mopti	Ségou	Sikasso	Tombouctou N
Jaune / 80 %	1086	474	1156	470	593	499	370	1172
Orange / 90 %	1290	591	1482	580	717	596	444	1404
Rouge / 97.5 %	1770	768	2126	768	942	795	603	1786

**Tableau 1:** Tableau des percentiles et niveaux d'alerte (hiver)

- Série chronologique de la médiane du multimodèle
- Calculé avec les sept dernières années
- Valeur maximale journalière de la concentration en surface
- On considère tous les points de la grille dans chaque province
- Seuils [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] basés sur les percentiles
- Comparaison prévision de la médiane avec les seuil pour assigner une couleur

## WAS: Remarques importantes



Couleur / Percentile	GAO N	Kayes	Kidal N	Koulikoro	Mopti	Ségou	Sikasso	Tombouctou N
Jaune / 80 %	1086	474	1156	470	593	499	370	1172
Orange / 90 %	1290	591	1482	580	717	596	444	1404
Rouge / 97.5 %	1770	768	2126	768	942	795	603	1786

- Comparaison de la prévision de la médiane avec les seuils calculés avec la série chronologique: prévision qualitative
- Qualifier la prévision de la concentration de poussière en surface

# Évaluation du système d'alerte avec les SYNOP

## Méthode et données utilisées

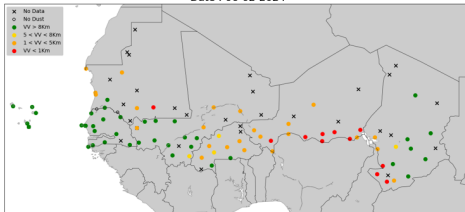
- Réduction de la visibilité, temps présent et humidité relative
- Filtrage des SYNOP
- Visibilité moyenne < 8000 m
- Humidité relative (70 %)
- Visibilité minimale journalière
- Seuils basés en les percentiles → Alertes de visibilité: jaune, orange, rouge
- Comparaison des alertes de visibilité avec des alerte du Système d'Alertes pour chaque province

## Résultats et limitations du système d'évaluation

- Limitation: pas assez de SYNOP
- Évaluation qualitative → pas de données de PM

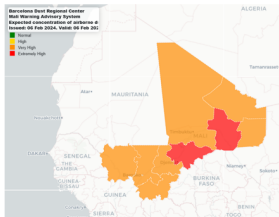
# WAS Evaluation Exemple: Mali

Visibility Verification from METAR/SYNOP bulletins by Stations  
 Date : 06-02-2024

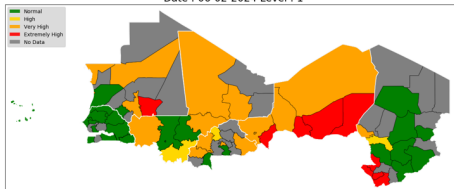


## Filter METAR & SYNOP:

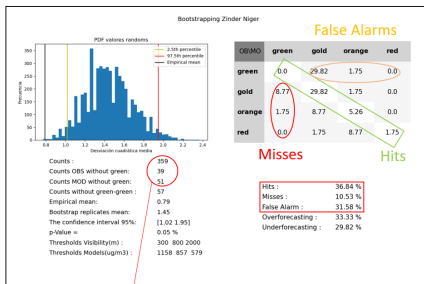
- RH < 70%
- Present Weather: DUST
- VIS daily mean < 8000 m



WAS from METAR/SYNOP bulletins THRESHOLD: Vis Range  
 Date : 06-02-2024 Level : 1



# Warning Advisory System: Persistence Comparison

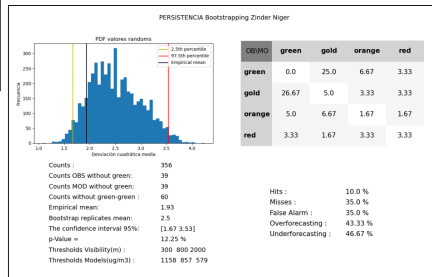


- Contingency table
- Define Index for evaluation
- No Green-Green days
- Bootstrapping
- Comparison with Persistence

WAS Evaluation 2021

Total days:	359
Days with dust event observed:	39
Days with warning observed or predicted:	59

## Persistence Evaluation 2021



# Warning Advisory System: Evaluation

## Conclusions

- Pas assez de stations SYNOP & METAR
- Évaluation qualitative → manque de données PM
- La visibilité est un bon indicateur pour les régions proches des sources de poussière
- Moins efficace pour les régions relativement éloignées → sur la côte
- **Régions homogènes en poussière → au lieu des divisions administratives**
- Meilleur que la persistance → Les prévisions WAS sont meilleures au début et à la fin d'une situation
- Évaluation objective → mise à jour WAS

# Outline

- 1 Introduction: SDS-WAS
- 2 Sources de poussières minérales
- 3 Cycle de la poussière
- 4 Modèle opérationnel: MONARCH
- 5 Produits multimodèle
- 6 Système d'alerte de tempêtes de poussière et sable
- 7 **Links**



## Links: WMO Barcelona Dust Regional Center

### Satellite

- EUMETSAT (géostationnaire)
- NASA (polaire)

### AOD, Visibilité, et PM

- AERONET
- METAR/TAF
- AirQo
- IQAir

### Information et courses

- MISVA (Monitoring and forecast of IntraSeasonal VARIability)
- MISVA: Cas d'étude
- COMET Course poussière
- EUMETSAT Workshop on Dust
- EUMETSAT Dust Aerosol Detection, Monitoring and Forecasting
- WMO SDS-WAS
- ACMAD: Warnings
- CAMS modèle: dust AOD

# WMO Annual Airborne Dust Bulletin and more ...



## Overview of global airborne dust in 2023

The global average of annual mean surface dust concentrations in 2023 was  $2.7 \mu\text{g m}^{-3}$ , one-fifth higher than slightly lower than that in 2022 ( $2.8 \mu\text{g m}^{-3}$ ), see 2022 Airborne Dust Bulletin, p. 75. The decrease in 2023 is mainly attributable to reduced dust emissions from several dust active regions around the world, such as North Africa, the Arabian Peninsula, the Sahel region, northern India, central Australia and north-western China. But annual mean surface dust concentrations over western Central Asia, north-central China and southern Mongolia in 2023 were higher than those in 2022. Altogether, the global annual mean surface dust concentration averaged  $1.0 \mu\text{g m}^{-3}$  in 2023.

Figure 1 shows the annual mean surface dust concentration averaged  $1.0 \mu\text{g m}^{-3}$  in 2023. In the northern hemisphere, dust concentrations reached their highest level ( $>10.0 \mu\text{g m}^{-3}$ ) in parts of central Australia and the west coast of South Africa. Dust that originates in the Sahel region from those regions can travel across the Sahel region and reach the Atlantic Ocean. In the southern hemisphere, dust concentrations reached their highest level ( $>10.0 \mu\text{g m}^{-3}$ ) in parts of central Australia and the west coast of South Africa. Dust that originates in the Sahel region from those regions can travel across the Sahel region and reach the Atlantic Ocean. In the southern hemisphere, dust concentrations reached their highest level ( $>10.0 \mu\text{g m}^{-3}$ ) in parts of central Australia and the west coast of South Africa. Dust that originates in the Sahel region from those regions can travel across the Sahel region and reach the Atlantic Ocean.

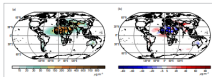


Figure 1 Annual mean surface concentration of mineral dust ( $\mu\text{g m}^{-3}$ ) in 2023. (a) Assembly of the annual mean surface dust concentration in 2023 between  $0^\circ$  and  $90^\circ$  North. (b) Assembly of the annual mean surface dust concentration in 2023 between  $0^\circ$  and  $90^\circ$  South.

- COP16 UN Convention to Combat Desertification (UNCCD) Riyadh, 2-13 Dec 2024
- UN Coalition on Combating SDS:



United Nations

International Day of Combating Sand and Dust Storms, 12 July

Le travail présenté ici est possible grâce au soutien de la collaboration des membres actifs du **SDS-WAS de l'OMM** et en particulier aux partenaires du nœud régional NAMEE.

Mes remerciements aux collègues du **BSC** et de l'**AEMET**.

Merci également aux chercheurs associés de la **NASA** (i.e. AERONET, MODIS) et EUMESAT ainsi qu'aux réseaux **inDust** et **DustClim**.



@Dust\_Barcelona

# Merci pour votre attention!