

Prévisibilité atmosphérique: chaos et effet papillon

R. Juvanon du Vachat
(Météo & Climat)

Plan

- Le modèle de Lorenz (1963), 1969
- Limite finie de prévisibilité ?
- Simulations numériques (Sun et Zhang, 2016)
Travaux de B-W Shen (2022)

Lorenz 1963 : Deterministic nonperiodic flow. *J. Atmos. Sci.*

Lorenz, 1969 : The predictability of a flow which possesses many scales of motion. *Tellus*

Modèle Lorenz (1963)

Modèle convection Rayleigh-Bénard simplifié

EDO 3 variables $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \sigma [y(t) - x(t)] \\ \frac{dy}{dt} = \rho x(t) - y(t) - x(t)z(t) \\ \frac{dz}{dt} = x(t)y(t) - \beta z(t) \end{cases}$$

$\rho = Ra/Rac$ rapport du « nombre de Rayleigh » à

Modèle Lorenz (1963)

σ = nombre de Prandtl (= 10)

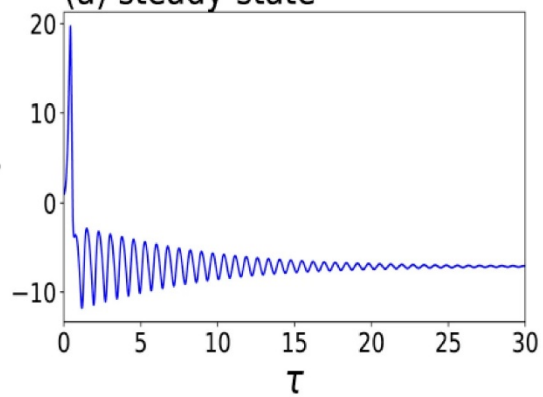
$\rho = Ra/Rac$ nombre de Rayleigh/Ra critique où la convection apparaît ($\rho = 24,74$) $\beta = 8/3$

- x, y, z = état du système à l'instant t
- $x(t) \sim$ intensité du mouvement de convection
- $y(t) \sim$ différence de température entre courants ascendants et descendants
- $z(t) \sim$ écart profil temp. vertical à profil linéaire.

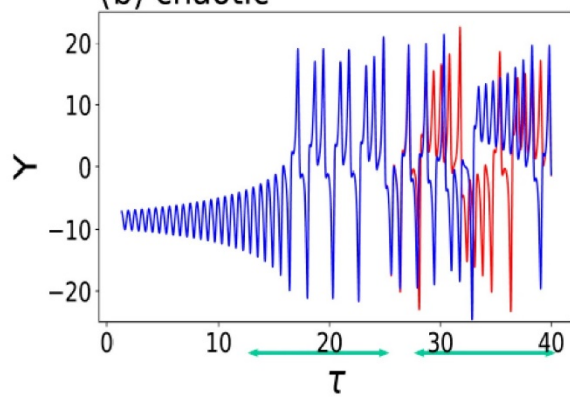
Résultats Lorenz (1963)

- On découvre la sensibilité à l'état initial (chaos)
- Espace des phases : répartition erratique des trajectoires
- Attracteur : ensemble limite vers lequel convergent les trajectoires dans l'espace des phases
- Attracteur étrange : a une dimension fractale (David Ruelle, 1970)

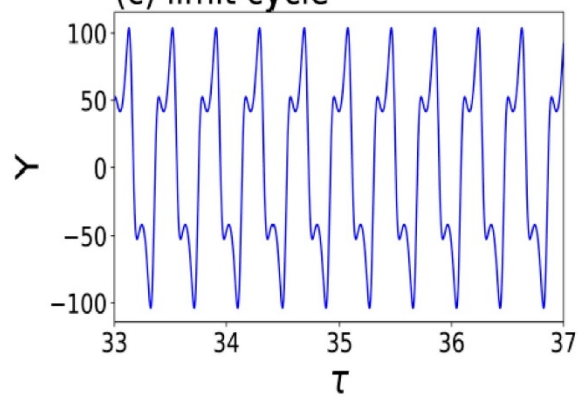
(a) steady-state



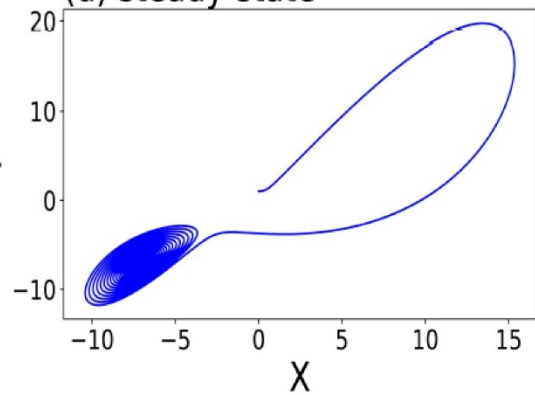
(b) chaotic



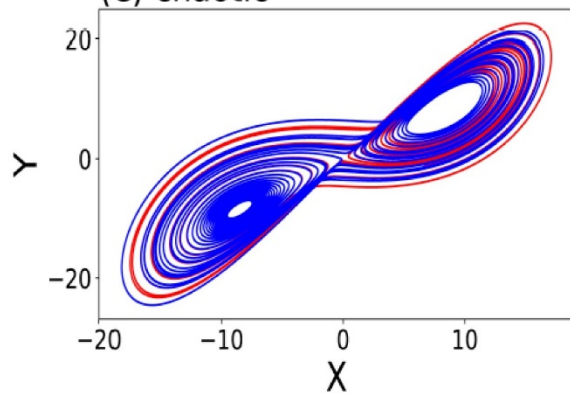
(c) limit cycle



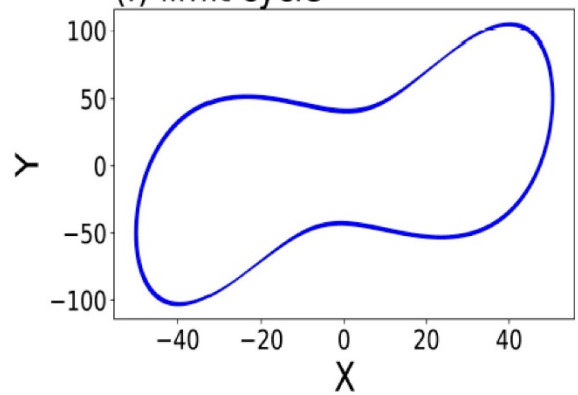
(d) steady-state



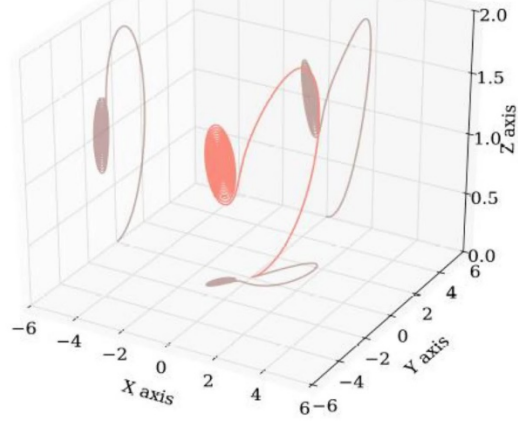
(e) chaotic



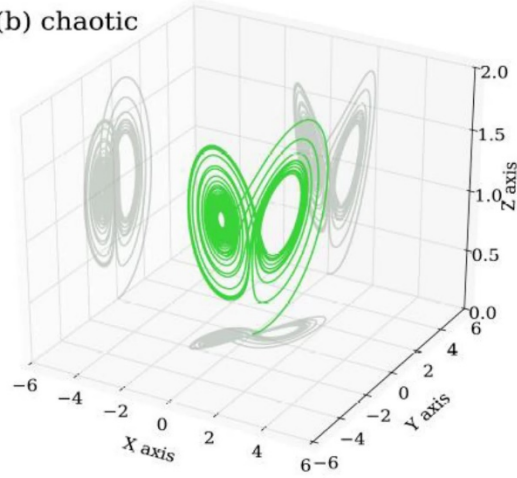
(f) limit cycle



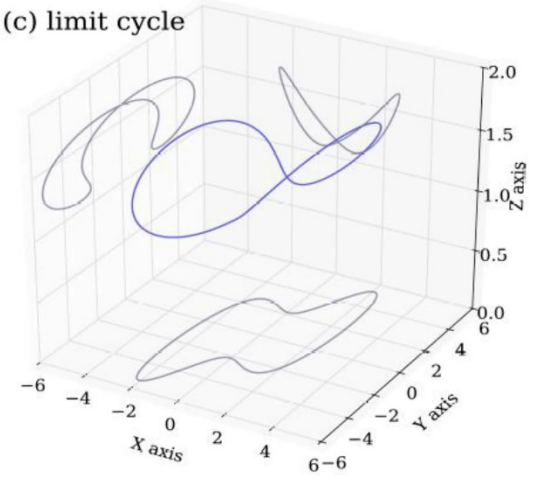
(a) steady-state



(b) chaotic



(c) limit cycle

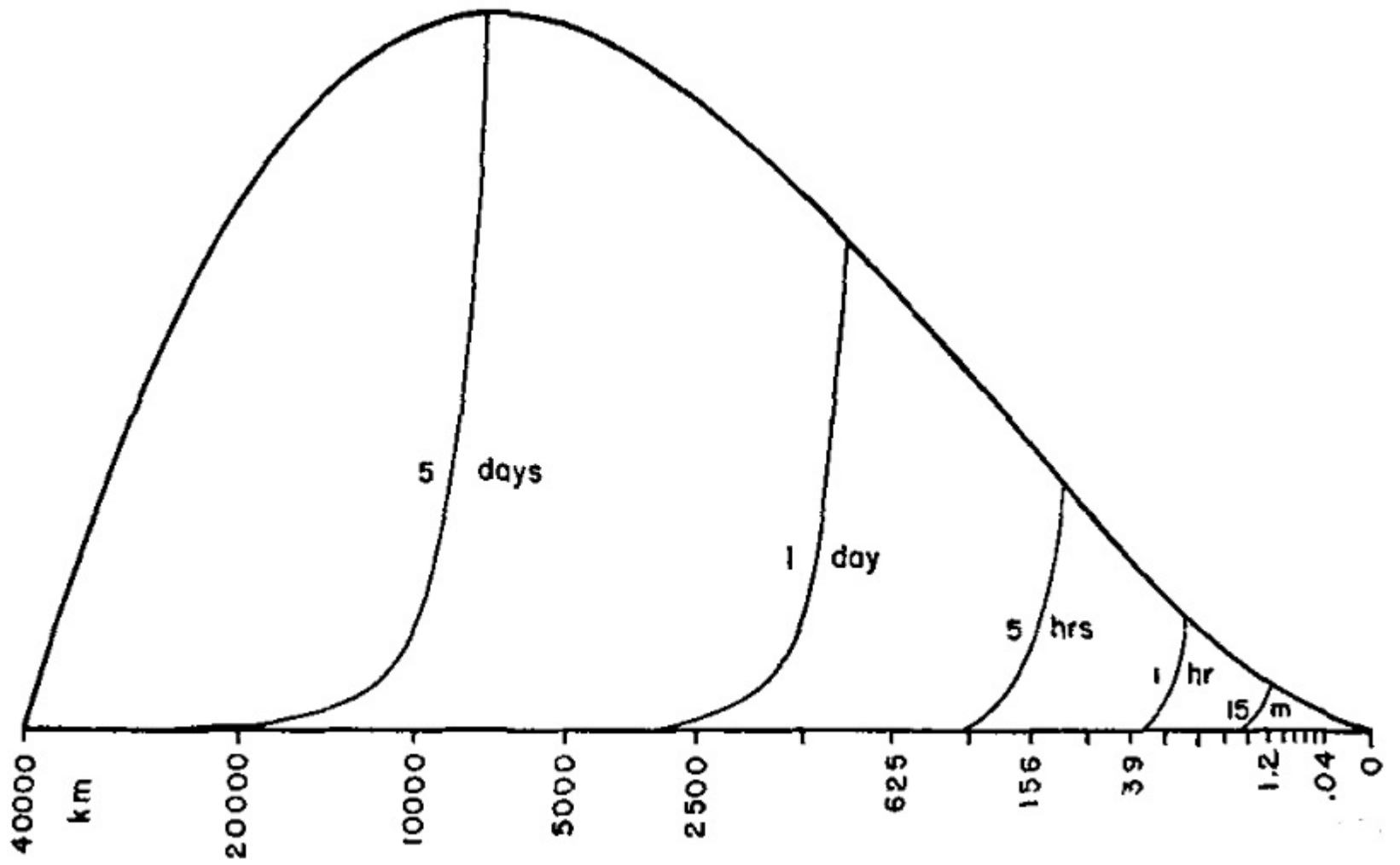


Lorenz (Tellus, 1969)

Système d'équations du tourbillon barotrope 2D en mode turbulent

- Evolution de l'énergie de l'erreur dans 3 config.
- Résultat sur Figure svte qui représente saturation de l'erreur f (échéance) (de 15 mn à 5 jours) & abscisse : échelle spatiale de 40 000 Km à 0,4 m.

Lorenz, 1969 : The predictability of a flow which possesses many scales of motion. *Tellus*



Une limite finie de prévisibilité ?

- Résultats math.(exist. & unicité) Navier-Stokes 2 D (Ladyzenskaya) impliquent prévisibilité infinie
- Leung et al., 2019 recalculent Tourbillon barotrope (Lorenz, 1969) et retrouvent une limite finie
- Rôle important dévolu à pente du spectre (-3 ou -5/3)
- Espèrent que des mathématiciens examinent la question !

Leung et al., 2019 : Atmospheric predictability : Revisiting the inherent finite-time barrier. JAS, 76, 3883-3892.

Simulations pour Prévisibilité (a)

Onde barocline humide (canal périod. 4×10^3 Km, 100 niv. z) 3 cas étudiés (Moist, RH50, DRY)

- Perturbations initiales NOISE (Gaussienne pour champ de Θ pot.) ou LARGE (mode barocline instable/gde éch.)
- FAKEDRY (sans convection)
- Modèle N-Hydro. WRF

Sun & Zhang, 2016 : Intrinsic/Practical limits of atmos. predictability and significance of butterfly effect. JAS

Simulations pour Prévisibilité (b)

Onde barocline humide (canal périod. 4×10^3 Km, 100 niv. z) 3 cas étudiés (Moist, RH50, DRY)

- Modèle conceptuel en 3 étapes :

- A) Convection \mapsto instabilité \mapsto saturation

- B) Ajust. géostrophique

- C) Instabilité barocline grande échelle

- Nuance Prévis. Intrinsèque et Pratique

- Sun & Zhang, 2016 : Intrinsic/Practical limits of atmos. predictability and significance of butterfly effect. JAS

From: Sun YQ, Zhang F. Intrinsic versus Practical Limits of Atmospheric Predictability and the Significance of the Butterfly Effect. *J. Atmos. Sci.*. 2016;73(3):1419-1438. doi:10.1175/JAS-D-15-0142.1

DOI: <https://doi.org/10.1175/JAS-D-15-0142.1>

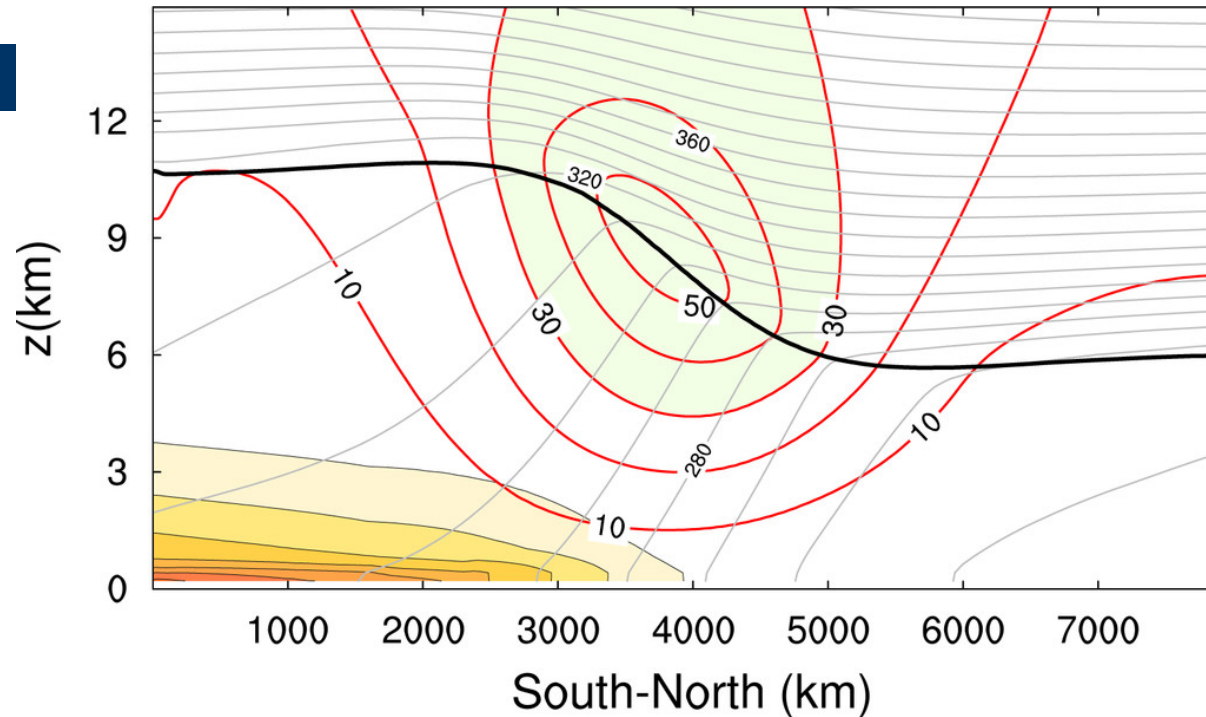
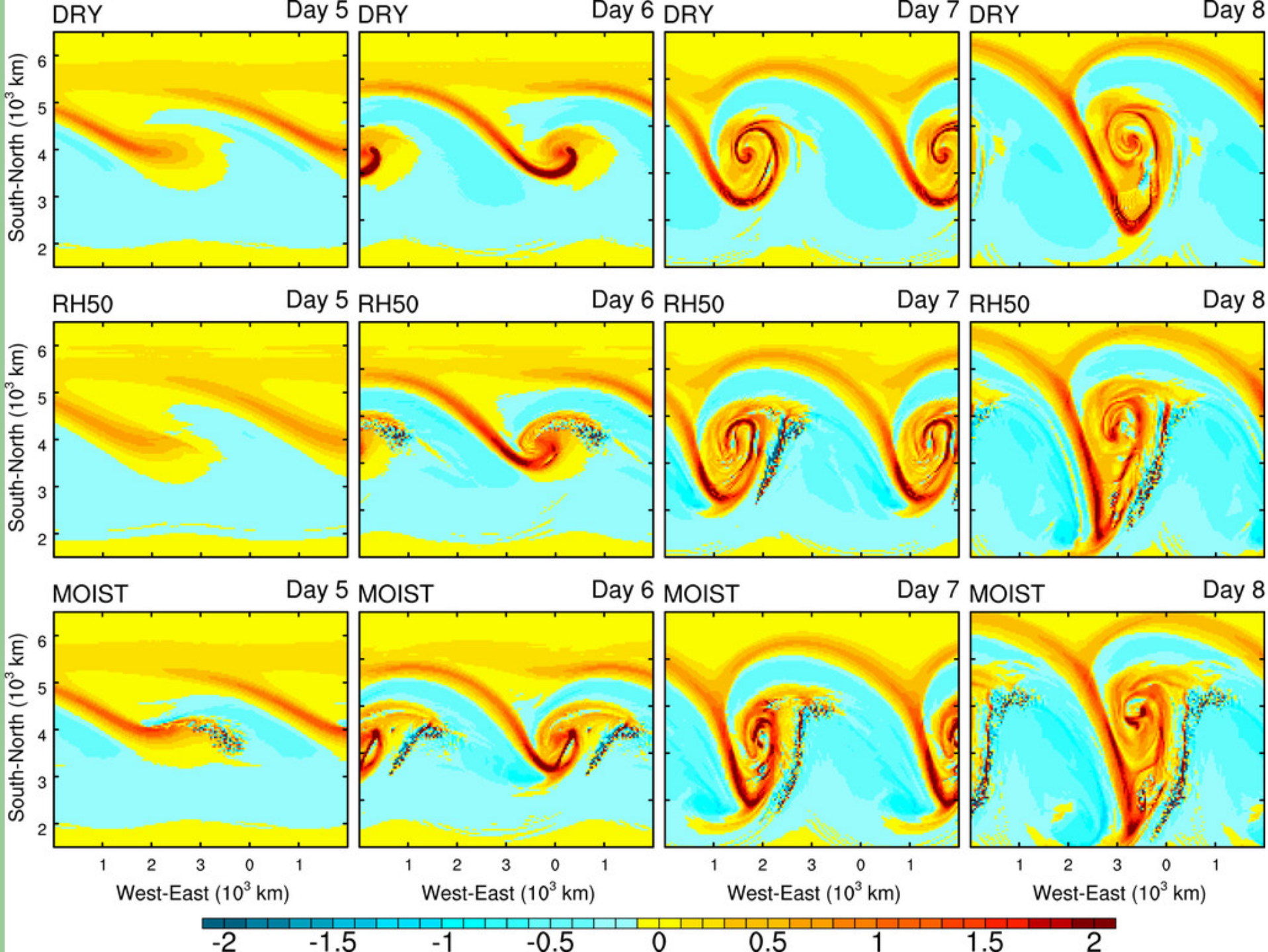


Fig. 1. Vertical cross section of the initial jet for zonal wind (red, every 10 m s⁻¹, >30 m s⁻¹ light green shaded), potential temperature (gray, every 5 K), the tropopause denoted by dark line where the potential vorticity equals 1.5 PVU, and initial water vapor mixing ratio (color starts at 2 g kg⁻¹ and is shaded every 2 g kg⁻¹).



Résultats de simulations

- Importance des processus humides (convection et précipitation) pour la prévisibilité à méso-échelle
- Implication en prévision d'ensemble (sous-dispersion)
- Humidité \mapsto Spectre éner. cinét. décroît -3 à $-5/3$
- Prévisibilité intrinsèque/pratique

Illustrations

- Sanchez et al. (2020) montre que les processus humides accélèrent la croissance d'erreur
- Etude systématique de prévisions ratées au CEPMMT en lien convection USA (Rodwell et al. 2013) ...Configuration météo particulière

Rodwell et al. 2013 : Characteristics of poor medium-range weather forecasts for Europe. BAMS,

Sanchez et al. , 2020 : Linking rapid forecast error growth to diabatic processes. QJRMS, **146**, 3548-3569

Travaux Bo-Wen Shen

- Mathématicien du chaos (San Diego, USA)
- Catégorisation modèles de Lorenz (1960 -2008)
- Effets papillon (trois types)
- Hypothèse Prévisibilité de 2 semaines
- Nature double (ordre et chaos) de l'atmos. (2022)

Shen B-W, 2022 : The dual nature of chaos and order in the atmosphere. Atmosphere, **13**, 1892.

Conclusion (A) Théorie

- Le chaos a envahi bcp de domaines (Lorenz 1963 cité env. 40 000 fois)
- Tests modèle jouet (effet papillon, sens. état initial) nombreux (informatique*, math.**)
- Nouveau langage (systèmes dynam., JF Royer)

*BW Shen, 2022 : The dual nature of chaos and order in the atmosphere. *Atmosphere*

**E. Ghys : L'attracteur de Lorenz Paradigme du chaos *Sémin. Poincaré (Juin 2010)*

Conclusion (B) Prévisibilité météo

- Prédi Ensemble = réponse au chaos atmosph. depuis 30 ans env. (Buizza, QJRMS 2019)
 - Du modèle jouet au modèle météo complet (Shen)
 - Paramétrisations physiques (humidité et processus irréversibles) changent la donne
 - Nombreux tests sur convection et précipitations (synthèse du modèle)
- Z : +précision \Rightarrow +prévisibil. (Moon, 2022, *Chaos*)