**🧠 I. Circulations atmosphériques à grande échelle : rappels physiques**

**1. Cellule de Hadley**

* C’est une cellule convective tropicale entre l’équateur et ≈30°N/S.
* L’air chaud et humide monte près de l’équateur → refroidit en altitude → redescend en zone subtropicale.
* Cette descente sèche crée les **zones arides subtropicales** (Sahara, Australie centrale…).

✅ **Réchauffement global** → renforce cette cellule → **expansion vers les pôles**.

**2. Zone de convergence intertropicale (ZCIT)**

* C’est la bande équatoriale où convergent les alizés des deux hémisphères.
* Ascendance d’air → formation de nuages convectifs → **pluies intenses (mousson, tropiques)**.

✅ Le **déséquilibre de réchauffement entre hémisphères** déplace la ZCIT :  
→ vers l’hémisphère qui se réchauffe **moins vite**, car l’alizé y est plus fort.

📌 Exemple : en Asie, la **ZCIT devient plus fluctuante**, ce qui modifie le **calendrier et la vigueur des moussons**.

**🔬 II. Impacts du réchauffement sur les systèmes régionaux**

**A. Mousson asiatique plus variable**

➡ Source : *Annexe V & Chap. 8.4.2 du GIEC AR6*

**Mécanisme thermique :**

* Une mousson est due à une **différence de réchauffement** entre le **continent (chauffe vite)** et l’**océan (chauffe plus lentement)**.
* Cela crée une dépression thermique → aspire de l’air humide océanique → précipitations saisonnières.

**Sous effet du réchauffement :**

* La terre chauffe **encore plus vite** que les océans.
* Mais les **aérosols humains** (en Inde, Chine) **refroidissent localement l’atmosphère**.
* Résultat : **forte variabilité** :
  + parfois moussons **plus fortes et soudaines**,
  + parfois **sécheresses prolongées**,
  + plus difficile à prévoir → agriculture menacée.

📊 **Graphique pertinent** : GIEC AR6 – Figure Annexe V.1 (représentation des modifications de l’intensité de la mousson)  
Lien : <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_AnnexV.pdf>

**B. Tempêtes plus intenses dans l’Atlantique Nord**

➡ Source : *Chapitre 11.7 et Figure 11.19 du GIEC AR6*

**Mécanisme physique :**

* Les cyclones tropicaux puis tempêtes extratropicales se forment là où :
  + la **température de la mer dépasse 26-27 °C**,
  + il y a une **forte humidité dans la troposphère**,
  + un **cisaillement vertical modéré** (vents pas trop différents en altitude).

**Sous effet du réchauffement :**

* 🌡️ **Températures de surface de l’océan Atlantique augmentent** → + énergie pour former des tempêtes.
* 💧 **Plus d’humidité dans l’atmosphère** → + fortes pluies associées aux tempêtes.
* 🔄 Modification du **Jet Stream** (courant d’altitude) → trajectoires plus imprévisibles.
* ↘️ Ralentissement de l’**AMOC** (circulation thermohaline) → modifie la trajectoire et intensité des dépressions.

📊 **Graphique pertinent** :

* **Figure 11.19** du GIEC AR6 (répartition et évolution des tempêtes extratropicales)  
  Lien : <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/chapter-11/> (aller à Fig. 11.19 dans le PDF)

**🌬️ III. Conséquences climatiques majeures**

| **Phénomène** | **Conséquence climatique directe** | **Confiance IPCC** |
| --- | --- | --- |
| Expansion des cellules de Hadley | Zones subtropicales plus sèches | Haute |
| Déplacement de la ZCIT | Régimes de pluie tropicaux plus instables | Moyenne à haute |
| Variabilité de la mousson asiatique | Risques agricoles (inondation/sécheresse) | Élevée |
| Intensification des tempêtes | Dommages côtiers, inondations, vents violents | Élevée |

Dans un climat en réchauffement, l’atmosphère ne se réchauffe pas de manière uniforme avec l’altitude, ce qui modifie profondément sa stabilité verticale. On parle alors de **réchauffement différentiel vertical** : la **troposphère basse** (près du sol) chauffe plus rapidement que les couches supérieures, notamment la **troposphère moyenne**, en raison du contact direct avec la surface terrestre chauffée par le rayonnement solaire. Ce déséquilibre renforce le **gradient thermique vertical**, c’est-à-dire la différence de température entre le bas et le haut de l’atmosphère. Or, d’un point de vue physique, ce gradient détermine si une masse d’air est stable ou instable : lorsqu’une parcelle d’air chaud et humide est plus légère que l’air environnant, elle devient flottante et entame une ascension. Plus ce gradient est fort, plus cette ascension est rapide et énergique. Cette montée d’air amplifie la **convection atmosphérique**, processus fondamental à la formation des nuages orageux. En s’élevant, la vapeur d’eau qu’il contient condense et libère de la chaleur latente, ce qui accentue encore la montée : c’est un **cercle amplifiant** typique des orages tropicaux intenses. L’énergie disponible pour ce processus est quantifiée par la **CAPE** (Convective Available Potential Energy), qui augmente fortement lorsque l’air est chaud et humide en basse couche et que les températures en altitude restent relativement basses. Cela conduit à une **instabilité convective accrue**, avec des ascendances violentes, des cumulonimbus très développés, et donc des précipitations intenses sur de courtes durées. C’est pourquoi, dans le contexte du changement climatique, l’augmentation du gradient thermique vertical favorise les pluies extrêmes, en renforçant les processus de convection profonde. Cette dynamique est particulièrement bien illustrée dans les zones touchées par l’ENSO (El Niño–Southern Oscillation), comme le montre l’article scientifique analysé, où une instabilité accrue précède souvent des événements pluvieux intenses et prolongés à grande échelle.

**1. Influence du réchauffement sur les cellules de Hadley**

Le réchauffement climatique modifie profondément la dynamique des **cellules de Hadley**, ces grandes boucles de circulation atmosphérique tropicale qui assurent le transport d’air chaud et humide depuis l’équateur vers les tropiques. En temps normal, l’air chaud monte à l’équateur sous l’effet de la convection, puis redescend dans les zones subtropicales, créant des courants aériens descendants secs responsables des zones arides (comme le Sahara ou le désert australien). Avec le réchauffement global, le **gradient de température entre l’équateur et les tropiques** devient plus marqué, car l’équateur se réchauffe moins vite que les régions subtropicales. Ce déséquilibre thermique pousse les cellules de Hadley à **s’étendre en latitude**, c’est-à-dire à "remonter" vers les pôles. Cette extension a des conséquences majeures : d’une part, les **zones de précipitation tropicale montent en latitude**, ce qui peut entraîner des inondations dans des régions auparavant plus tempérées ; d’autre part, les **zones sèches descendent dans les moyennes latitudes**, contribuant par exemple à l’**avancée du désert du Sahara**, ou encore aux **sécheresses accrues dans le bassin méditerranéen**, en Afrique du Sud ou au Chili. Ce mécanisme est l’un des plus robustes identifiés par le GIEC pour expliquer l’augmentation des extrêmes hydrologiques à l’échelle globale.

**2. Déplacement de la ZCIT (Zone de convergence intertropicale)**

La **ZCIT**, ou zone de convergence intertropicale, est une bande équatoriale où convergent les alizés des deux hémisphères, forçant l’air à monter et produisant des nuages épais, des orages tropicaux et des pluies diluviennes. La position de cette zone est extrêmement sensible à la **distribution des températures de surface entre les deux hémisphères**. Si l’un des hémisphères se réchauffe plus vite que l’autre — comme c’est le cas aujourd’hui avec un **réchauffement plus rapide de l’hémisphère Nord**, plus continental — alors la ZCIT **se décale vers l’hémisphère le plus froid**, par effet d’asymétrie dans la circulation atmosphérique. Cela provoque un **déplacement des régimes de précipitation saisonnière**, en particulier dans les régions tropicales (Afrique de l’Ouest, Amazonie, Asie du Sud), et rend les saisons des pluies **moins prévisibles** et parfois **plus intenses**, car comprimées dans le temps. Ainsi, le déplacement de la ZCIT est un bon exemple de lien entre **mécanique atmosphérique globale** et **conséquences locales sur les précipitations**.

**3. Pourquoi ces changements entraînent-ils des pluies plus intenses ? (Physique)**

Les modifications des circulations atmosphériques décrites précédemment s’accompagnent d’un autre effet crucial : l’**intensification du cycle de l’eau**, liée aux propriétés physiques de la vapeur d’eau. Plus précisément, l’air chaud peut contenir **environ 7 % de vapeur d’eau en plus par degré Celsius de réchauffement**, selon la loi de Clausius-Clapeyron. Cela signifie qu’une masse d’air chaude contient **beaucoup plus d’humidité** qu’avant — donc, lorsqu’elle monte et se condense, elle libère une **quantité accrue d’énergie latente**, qui chauffe encore davantage l’air et accélère la montée. Ce phénomène **renforce l’instabilité convective**, provoque des **ascendances verticales très rapides**, et donne naissance à des nuages d’orage de très grande extension verticale (cumulonimbus). Cela explique pourquoi, dans un climat plus chaud, on ne voit pas seulement **plus de pluie**, mais surtout **des pluies plus violentes concentrées sur des durées plus courtes**, avec un risque élevé d’inondations éclairs, notamment lors des tempêtes estivales ou des cyclones tropicaux.

**4. Exemples régionaux : Tempêtes extratropicales dans l’Atlantique Nord**

Dans les moyennes latitudes, les **tempêtes hivernales**, aussi appelées **dépressions extratropicales**, se forment le long du **Jet Stream**, un courant rapide situé en haute altitude, alimenté par le **gradient de température entre les tropiques et les pôles**. Or, dans le contexte du réchauffement global, les pôles (notamment l’Arctique) se réchauffent **beaucoup plus vite** que les régions équatoriales, ce qui **réduit ce gradient de température**. Le Jet Stream devient alors **plus ondulant**, moins rapide, et parfois instable. Cela provoque des situations dites de **blocage atmosphérique**, où une dépression ou un anticyclone stagne sur une région pendant plusieurs jours. Ce blocage peut engendrer des épisodes de **pluie extrême persistante**, comme lors de la tempête Alex en Europe (2020), où les Alpes-Maritimes ont reçu l’équivalent de plusieurs mois de pluie en quelques heures. Ces tempêtes deviennent également **plus lentes mais plus puissantes**, car elles disposent de plus d’humidité à condenser. Le lien entre affaiblissement du Jet Stream et intensification des extrêmes pluviométriques dans l’Atlantique Nord est désormais solidement établi par la dynamique des fluides atmosphériques.

**5. Exemple régional : Mousson asiatique plus irrégulière et plus intense**

La **mousson asiatique** résulte d’un contraste thermique saisonnier entre le continent asiatique et l’océan Indien : en été, la terre se réchauffe plus vite que l’océan, créant une dépression thermique qui aspire de l’air humide vers l’intérieur des terres. Avec le réchauffement global, ce différentiel thermique est **accru**, et l’air transporté devient **plus chaud et plus humide**, ce qui **augmente la convection** et favorise des **pluies torrentielles** pendant les épisodes actifs. Mais ce système est également perturbé par la **présence d’aérosols anthropiques**, tels que les sulfates, qui **refroidissent localement l’atmosphère** en réduisant l’ensoleillement. Cela crée un **déséquilibre thermique instable** entre les zones affectées par les GES (effet réchauffant) et celles affectées par les aérosols (effet refroidissant). Résultat : la mousson devient **plus irrégulière**. On observe des alternances de **sécheresses longues** suivies de **décharges de pluie extrême** concentrées sur quelques jours. Ce régime déstabilisé pose des défis majeurs pour l’agriculture, les réserves d’eau, et la prévision météorologique à long terme.

**🌍 A. Expansion des cellules de Hadley et déplacement de la ZCIT**

* **Expansion des cellules de Hadley** :
  + **Chapitre 8 – Section 8.4.2.1** : Cette section traite des changements dans la circulation atmosphérique, notamment l'expansion des cellules de Hadley vers les pôles.
  + **Figure 8.21** : Schéma illustrant les changements à grande échelle de la circulation atmosphérique et leurs impacts sur le cycle hydrologique régional. [ipcc.ch+1ipcc.ch+1](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/figures/chapter-8/figure-8-21/?utm_source=chatgpt.com)
* **Déplacement de la ZCIT (Zone de Convergence Intertropicale)** :
  + **Chapitre 8 – Section 8.4.2.2** : Analyse des changements dans la position de la ZCIT en réponse aux asymétries de réchauffement entre les hémisphères.
  + **Figure 8.21** : La même figure mentionnée ci-dessus illustre également les déplacements de la ZCIT.

**🌧️ B. Intensification des précipitations extrêmes (loi de Clausius-Clapeyron)**

* **Chapitre 8 – Section 8.2.2.1** : Cette section explique comment l'augmentation de la température entraîne une augmentation de la teneur en vapeur d'eau de l'atmosphère, conformément à la relation de Clausius-Clapeyron, estimée à environ 7 % d'augmentation de l'humidité spécifique par degré Celsius de réchauffement. [ipcc.ch](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/chapter-8/?utm_source=chatgpt.com)

**🌬️ C. Tempêtes extratropicales et ondulations du Jet Stream**

* **Chapitre 11 – Section 11.7.2** : Évaluation des changements dans les tempêtes extratropicales, y compris les cyclones extratropicaux et les rivières atmosphériques, et leur lien avec les ondulations du Jet Stream.
* **Figure 11.20** : Schéma récapitulatif des changements passés et projetés dans les cyclones tropicaux, les cyclones extratropicaux, les rivières atmosphériques et les tempêtes convectives sévères. [ipcc.ch](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/figures/chapter-11/figure-11-19/?utm_source=chatgpt.com)

**🌾 D. Variabilité de la mousson asiatique et influence des aérosols**

* **Annexe V – Section AV.4.1** : Définition et caractéristiques de la mousson d'Asie du Sud et du Sud-Est, y compris les changements observés et projetés dans le contexte du changement climatique. [ipcc.ch](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_AnnexV.pdf?utm_source=chatgpt.com)

**📘 E. Résumé technique et synthèse des extrêmes climatiques**

* **Résumé technique – Section TS.2.6** : Synthèse des changements observés et projetés dans les événements climatiques extrêmes, y compris les précipitations extrêmes, les sécheresses et les tempêtes.

**🌍 Amplification du cycle hydrologique : explication physique**

Le **cycle hydrologique** désigne l'ensemble des processus par lesquels l'eau circule dans le système climatique : évaporation, condensation, précipitations, ruissellement, infiltration et transpiration. Avec le réchauffement climatique, ce cycle s'intensifie, phénomène connu sous le nom d'**amplification du cycle hydrologique**.

**🔬 Mécanismes physiques**

1. **Augmentation de la capacité de l'air à contenir de la vapeur d'eau** : Selon la loi de Clausius-Clapeyron, pour chaque degré Celsius supplémentaire, l'atmosphère peut contenir environ 7 % de vapeur d'eau en plus. Cela signifie que l'air plus chaud peut transporter davantage d'humidité, augmentant ainsi le potentiel de précipitations.
2. **Renforcement des précipitations extrêmes** : Une atmosphère plus humide favorise des événements de précipitations plus intenses, car une plus grande quantité de vapeur d'eau peut se condenser rapidement, libérant de l'énergie et intensifiant les orages.
3. **Modification des schémas de précipitations** : Les régions déjà humides tendent à devenir plus humides, tandis que les zones sèches peuvent devenir encore plus arides, exacerbant les conditions de sécheresse.
4. **Accroissement de l'évapotranspiration** : Des températures plus élevées augmentent l'évaporation de l'eau des sols et la transpiration des plantes, ce qui peut assécher les sols et affecter la disponibilité en eau.

**📚 Références du GIEC AR6 (Groupe de travail I)**

Pour approfondir ces points, voici les sections pertinentes du rapport :

* **Chapitre 8 : Changements du cycle de l'eau**
  + *Section 8.2.1.1.2* : Réponses régionales des précipitations au forçage radiatif.
  + *Section 8.2.1.2* : Contraintes thermodynamiques sur les changements à grande échelle du cycle de l'eau.
  + *Section 8.3* : Évolution du cycle de l'eau et raisons sous-jacentes.
  + *Figure 8.21* : Illustration des changements à grande échelle de la circulation atmosphérique et leurs impacts sur le cycle hydrologique régional.
* **Résumé technique**
  + *Encadré TS.6* : Intensification du cycle hydrologique.
  + *Section TS.2.6* : Changements observés et projetés dans les événements climatiques extrêmes, y compris les précipitations extrêmes.