

SCA 7041 - 42

Chapitre X

La circulation générale, l'effet de Coriolis et l'expérience du bassin tournant

Dû au fait que la Terre est ronde, le rayonnement solaire reçu à la surface est inégal. Les régions équatoriales jouissent d'une radiation solaire incidente abondante, alors qu'à l'extrême, les pôles, subissent, en moyenne, une faible insolation. Cette différence dans le réchauffement de la surface du globe entraîne la formation d'une région chaude à l'équateur et d'une région froide au pôle, formant ainsi un vaste gradient de température dans la direction pôle-équateur. Ce gradient de température pôle-équateur est le moteur de la circulation atmosphérique générale. La force de Coriolis, l'effet de la rotation du globe, est pour sa part, le processus qui module le patron de la circulation. Afin de démontrer que la circulation atmosphérique globale observée est essentiellement le résultat des effets de la différence de température latitudinale et de la rotation terrestre, les scientifiques ont élaboré une expérience en laboratoire nommée « l'expérience du bassin tournant ».

1. Expérience du bassin tournant

Montage

L'expérience tente de recréer en laboratoire la circulation atmosphérique à l'échelle du globe. Le montage consiste en un cylindre de métal extérieur qui est chauffé et un cylindre intérieur qui lui est refroidi. Le cylindre extérieur représente les régions équatoriales tandis que le cylindre intérieur représente un pôle. L'espace entre les deux cylindres est rempli avec un fluide un peu plus visqueux que l'eau et saupoudré de petits flocons d'aluminium pour permettre une bonne visibilité des mouvements du fluide. Ce montage est placé sur une plaque tournante dont la vitesse de rotation est réglable. Les mouvements sont observés grâce à une caméra fixée au-dessus du bassin et qui tourne avec le montage. La caméra nous donne donc un point de vue semblable à un observateur en rotation positionné au-dessus du pôle nord, où la surface du fluide représente le sommet de la troposphère. Le fait de chauffer la paroi extérieure du bassin et de maintenir le centre froid, tente de reproduire le gradient de température pôle-équateur de la Terre. Voyons maintenant les circulations que l'on observe à l'intérieur du bassin en exécutant l'expérience avec des paramètres particuliers.

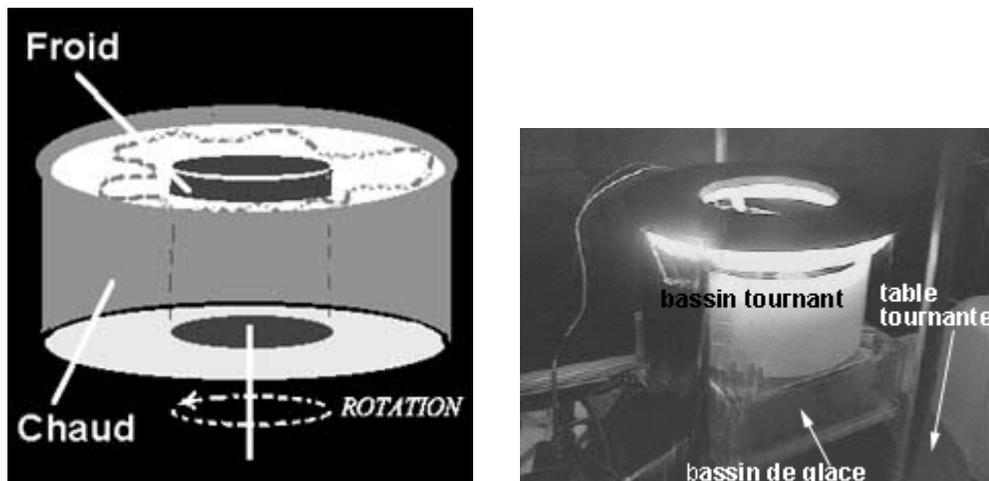


Figure X.1 : Gauche : Schéma du bassin tournant. Le cylindre extérieur est chauffé par un courant électrique tandis que le cylindre intérieur est refroidi par un bain de glace au centre. Le bassin repose sur une table tournante. Droite : Photo du montage.

Cas avec un gradient de température mais sans rotation.

Dans cette situation, l'extérieur du bassin est chauffé et l'intérieur refroidi, mais le montage demeure fixe. On observe alors que le fluide chauffé par la paroi du cylindre extérieur présente un mouvement ascendant près de cette paroi (figure X.2). Lorsque le fluide atteint la surface libre, il se dirige vers le centre du bassin, là où le fluide est plus froid. Le liquide refroidi par la paroi du cylindre intérieur plonge vers le fond du bassin pour se diriger ensuite vers la paroi extérieure. La circulation ainsi générée par le gradient de température seul présente une cellule méridionale dans laquelle le fluide circule vers le centre en surface et vers l'extérieur dans le fond du bassin. Cette circulation est appelée « cellule de Hadley ». L'écoulement généré dans le bassin tente donc de répartir la chaleur uniformément dans le bassin, le liquide froid voyage en surface vers la partie chaude (l'extérieur du bassin, l'équateur), alors que le liquide chaud s'écoule vers le centre, la partie froide du bassin (le pôle). La circulation est dans le plan vertical comme dans une brise de mer. La circulation produit un transport horizontal de la chaleur de l'équateur au pôle sur la surface supérieure et l'inverse en bas.

Si la Terre ne tournait pas sur elle-même, tout porte à croire que l'on observerait deux cellules similaires à celles observées dans l'expérience du bassin tournant sans rotation (figure X.2), une pour chaque hémisphère. Au siècle dernier, alors que les mesures météorologiques se faisaient beaucoup plus rares qu'aujourd'hui, on croyait que la circulation atmosphérique se faisait suivant ce patron (figure X.3). Ce modèle simpliste fut proposé par M. Hadley au 19^e siècle, mais les observations ont vite démontrées l'inexactitude de ce modèle.

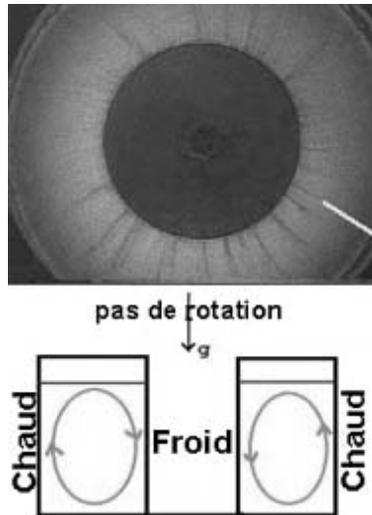


Figure X.2 : Expérience du bassin tournant vue par le dessus. La paroi extérieure est chauffée tandis que la paroi intérieure est refroidie. Il n'y a pas de rotation. À la surface, le fluide circule de l'extérieur vers le centre. Source : Université du Colorado, cours ATOC1050.

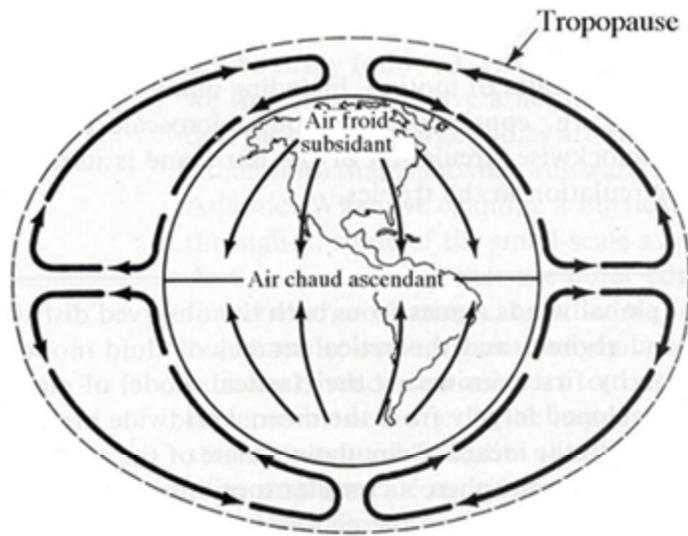


Figure X.3 : Modèle de circulation selon les cellules de Hadley, tel qu'imaginé au 19^e siècle.

3. Bassin tournant avec un gradient de température et un faible taux de rotation

Dans un second cas, le bassin est soumis au même gradient de température que précédemment, mais cette fois la table tournante est activée afin de générer un faible taux de rotation. Dans cette situation, (figure X-11), on observe la naissance d'un écoulement oblique dirigé à la fois dans le sens de rotation et vers le centre (le pôle) à la surface supérieure libre. En profondeur, la circulation oblique est dans la direction contraire de rotation et converge vers l'extérieur du bassin (l'équateur) pour remonter vers la surface sur les bords. L'ajout du faible taux de rotation à l'expérience entraîne donc une légère déviation dans l'écoulement. Cette déviation observée est causée par la rotation du bassin qui fait intervenir l'effet de Coriolis. Le tout produit une circulation tridimensionnelle comparable à celle de la cellule de Hadley, où encore une fois le liquide le plus chaud et le plus froid se dirige, respectivement, vers les régions chaude et froide du bassin.

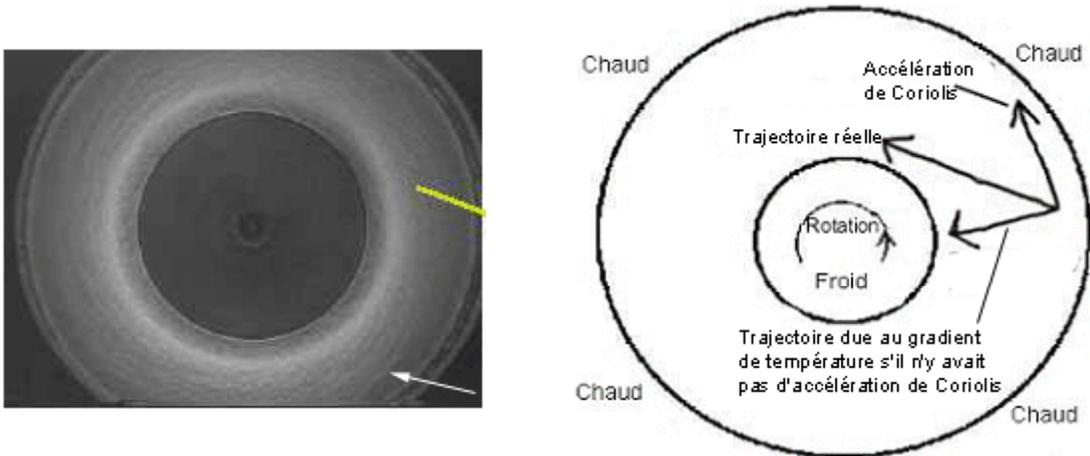


Figure X-11 : Expérience du bassin tournant vue par le dessus. La paroi extérieure est chauffée tandis que la paroi intérieure est refroidie. Le bassin subit une faible rotation. À la surface, le fluide circule en diagonale, de l'extérieur vers le centre. Source : Université du Colorado, cours ATOC1050.

4. Circulation avec un gradient de température et un taux de rotation moyen vs la circulation de l'atmosphère terrestre

Lorsqu'on répète l'expérience en augmentant le taux de rotation du bassin, l'écoulement devient cette fois très différent. On observe la formation d'une onde avec une série de 5 crêtes et creux qui ceinture le bassin et qui se propage dans le même sens que la rotation du bassin (sens anti-horaire = sens de rotation de la Terre). On observe également (figure X-12) la formation, à l'intérieur (coté froid) de l'onde, d'un courant jet, une étroite bande où la circulation à la surface supérieure se fait plus rapidement qu'ailleurs. La circulation dans l'onde déplace le liquide froid du centre vers la paroi extérieure et vice versa, permettant ainsi une redistribution horizontale de la chaleur en amenant le liquide froid vers l'extérieur et le liquide chaud vers l'intérieur du bassin. Notez bien que cette redistribution de la température se fait par une circulation sur le plan horizontal. On note aussi à la surface supérieure du fluide la présence, en alternance, de basses

pressions (cyclones) et de hautes pressions (anticyclones) localisés de part et d'autre de l'onde. Les basses pressions (cyclones) se trouvent du côté de la paroi intérieure (côté froid) tandis que les hautes pressions (anticyclones) se trouvent du côté de la paroi extérieure (côté chaud). Il y a donc en moyen une pression plus faible dans les "hautes latitudes" qui correspond aux basses pressions normalement observées près de 60°N (figure X-14 a et b) et une pression en moyenne plus forte vers les basses latitudes qui correspond aux hautes pressions sous-tropicales. On trouve aussi une circulation presque circulaire et anti-horaire (=cyclonique) autour de ces basses pressions et horaire (=anti-cyclonique) autour des hautes pressions. Ces circulations horaires et anti-horaires sur le plan horizontal contribuent aussi à uniformiser horizontalement la température du liquide.

Il est intéressant de réaliser que le patron de circulation, dans ce cas, est similaire à celui observé dans la troposphère aux latitudes moyennes (hémisphères Nord et Sud). On retrouve effectivement une bande ondulatoire qui ceinture la Terre avec des cyclones et des anticyclones de chaque côté de cette bande.

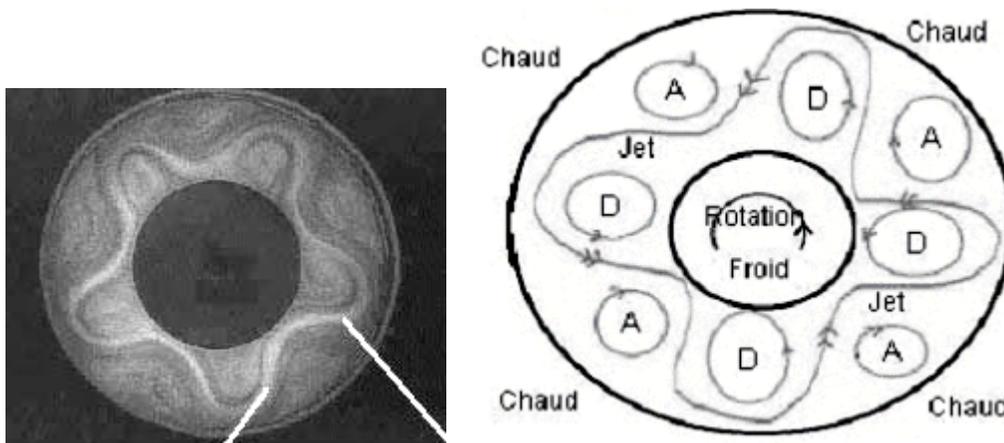


Figure X-12: À gauche : Photo de l'expérience du bassin tournant vue par le dessus. La paroi extérieure est chauffée tandis que la paroi intérieure est refroidie. Le bassin subit une rotation d'intensité moyenne. À la surface libre, le fluide circule de façon complexe en formant une onde et des cyclones et anticyclones de chaque côté de cette onde. À droite : Schéma de la circulation observée sur la photo de gauche où les lettres A et D représentent les positions respectives des anticyclones et des cyclones. Source : Université du Colorado, cours ATOC1050.

La figure X-13 présente une image instantanée de l'atmosphère vu du pôle Nord. Un patron ondulatoire ceinturant les latitudes moyennes de même que plusieurs cyclones (L = dépression) et des anticyclones (H = haute pression) sont aussi observables en altitude. Le patron général de la circulation en altitude observé n'est pas aussi structuré comme dans le cas de l'expérience du bassin tournant en régime stable. Ceci s'explique par le fait que l'expérience du bassin tournant néglige (et ne peut reproduire) plusieurs paramètres existant sur Terre, comme les effets des océans et de la condensation entre autres, qui font que la circulation atmosphérique présente un régime beaucoup plus chaotique que celui observé en laboratoire.

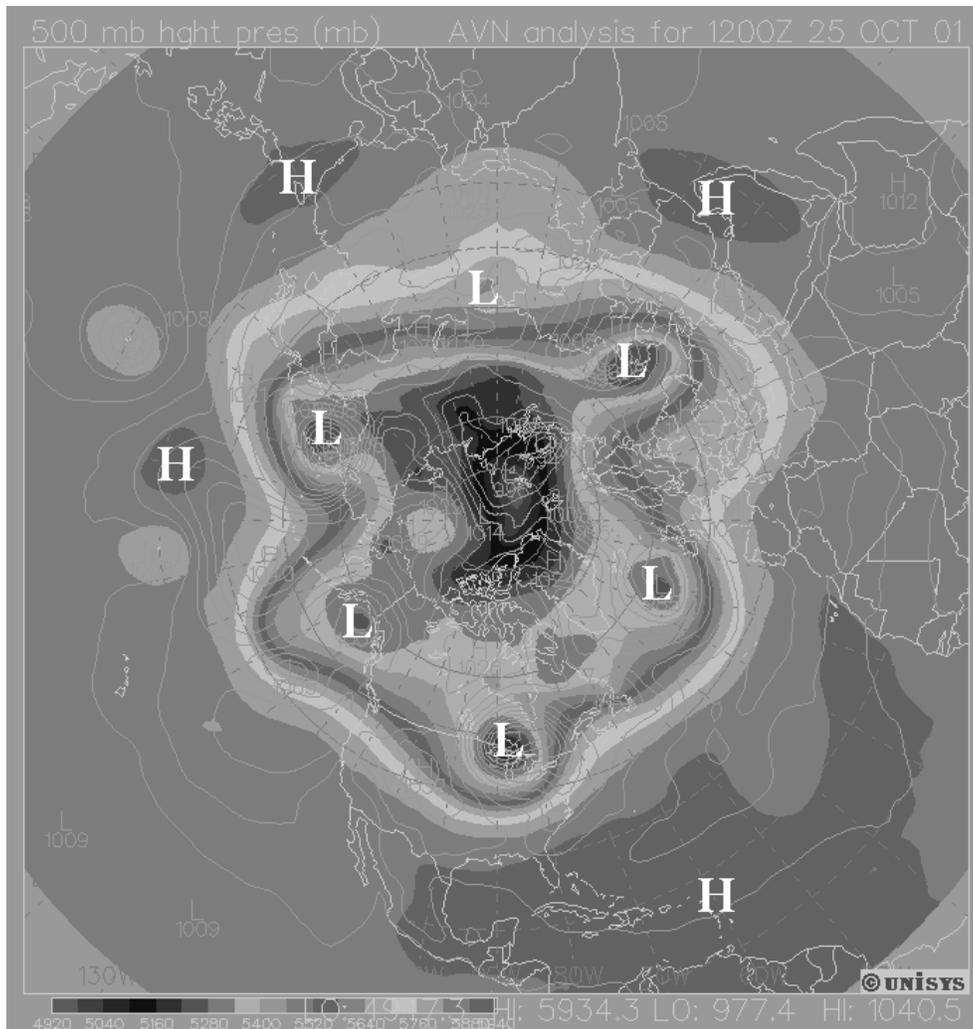


Figure X-13 : Carte de distribution de pression dans la haute troposphère à 00Z le 25 octobre 2001. Les teintes de gris représentent les différentes isobares. Les lignes pleines (très pâles) représentent les isobares à la surface.

Le cas de la zone de convergence intertropicale

Le régime de circulation qui prévaut dans les régions tropicales est bien différent de celui des latitudes moyennes et polaires. Sur les images satellites, on peut y observer en tout temps une bande nuageuse plus ou moins continue qui ceinture l'équateur (figure X-15). Sur les cartes synoptiques, on note la présence d'une bande de basse pression oscillant autour de l'équateur où les vents (les alizés) convergent à l'équateur, d'où le nom de zone de convergence intertropicale (en moyenne voir les figures X-14 a et b).

Les processus liés à la naissance de cette circulation demeure à ce jour un mystère pour les météorologues. Si on se réfère à l'expérience du bassin tournant, on pourrait à première vue être tenté de croire que le régime de circulation dans les latitudes tropicales correspond au cas où le bassin est soumis à un gradient de température et à une faible rotation. On observe dans ces circonstances la naissance d'un écoulement oblique en profondeur (à la surface de la Terre) qui converge vers l'extérieur du bassin (l'équateur) pour s'élever sur les bords. À la surface du bassin (représentant l'atmosphère en altitude) l'écoulement diverge obliquement vers le centre

(les pôles). En effet, l'effet de la rotation terrestre est faible dans les régions tropicales (et même nul à l'équateur même). Cependant, les gradients horizontaux de température y sont pratiquement inexistant, les régions tropicales représentant plutôt un vaste bassin d'air chaud relativement uniforme. De ce fait, l'expérience du bassin tournant ne peut nous apporter d'informations sur la naissance de la circulation équatoriale.

Même si l'origine de cette bande de convergence demeure inexpiquée, il est toutefois possible de comprendre pourquoi elle est constamment observable. On peut en effet dire que la région de convergence s'auto régénère. La présence des anticyclones subtropicaux aux environs des 30° parallèles (voir figures X-14 a et b), forme une vaste région où le ciel est dégagé en permanence (figure X-15). Par ce fait, le rayonnement solaire est intensif à ces niveaux et favorise une évaporation massive à la surface des océans (surface océanique qui prédomine à ces latitudes). Les alizés, formés par la présence de la bande de basse pression qui ceinture l'équateur, font converger cette masse d'air chargé d'humidité des deux hémisphères vers l'équateur. En s'élevant, cet air humide se condense, entraînant ainsi la formation de précipitations. De plus, cette condensation entraîne un important dégagement de chaleur dans l'atmosphère. Ce réchauffement local en altitude contribue alors à faire diminuer la pression au sol (voir chapitre 8, réchauffement local en altitude), contribuant ainsi à maintenir la présence d'une bande de basse pression au niveau de l'équateur. Le maintien de la région de basse pression assure dès lors le maintien des alizés et leur apport en air chargé d'humidité, faisant ainsi de la circulation au niveau de l'équateur, un régime en constante auto régénérescence.

La zone de convergence intertropicale participe aussi grandement à la répartition de la chaleur à l'échelle planétaire. Par le mouvement ascendant et la condensation importante qu'elle entraîne, elle génère ainsi un transport de chaleur sur le plan vertical, différents du transport de chaleur majoritairement sur le plan horizontal qui s'effectue aux autres latitudes.

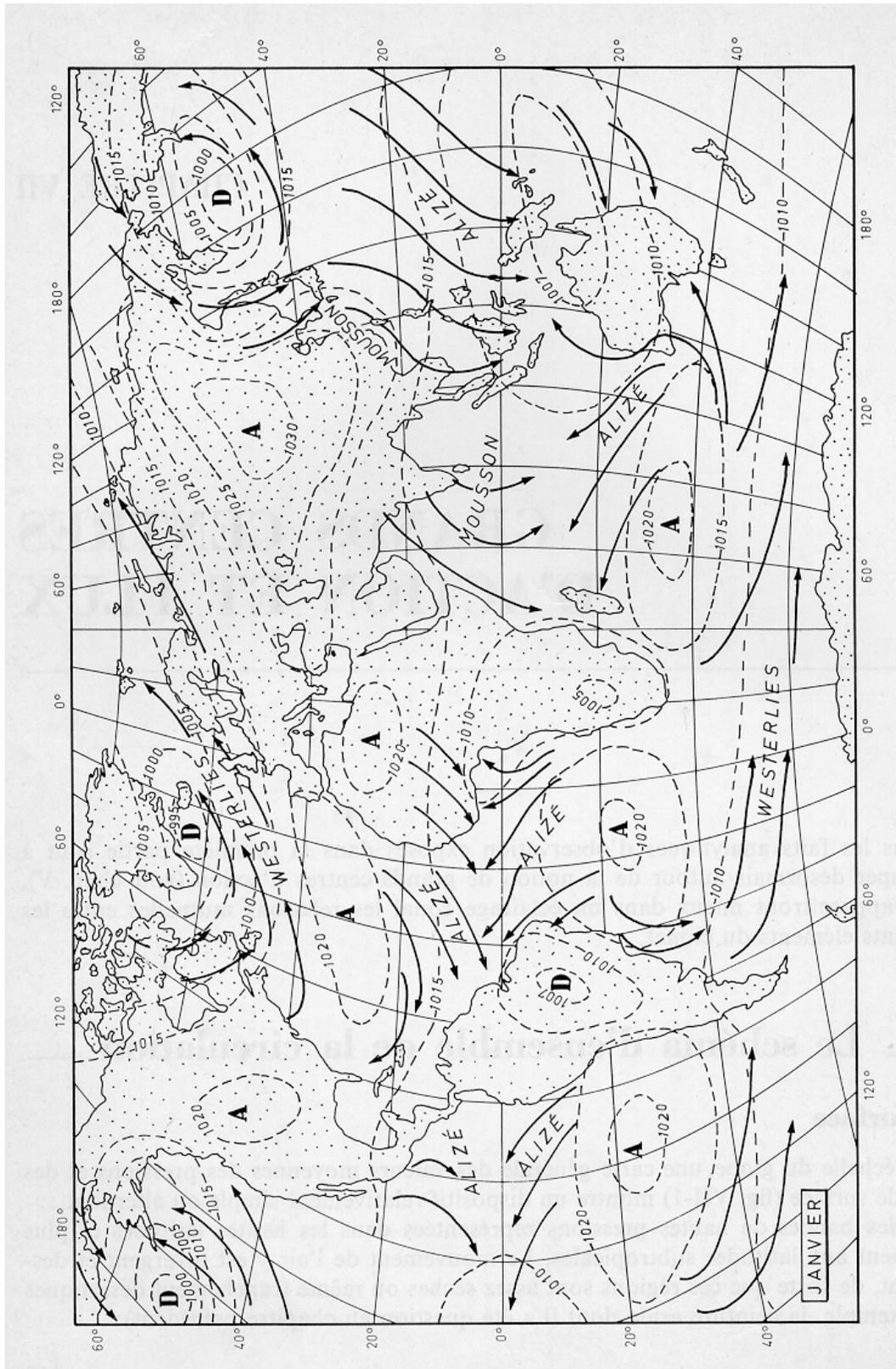


Figure X-14a RÉPARTITION MOYENNE DES PRESSIONS ET DES PRINCIPAUX FLUX À LA SURFACE DU GLOBE-Janvier. Les pressions sont données en mbar. Source: Estienne et Godard 1970.

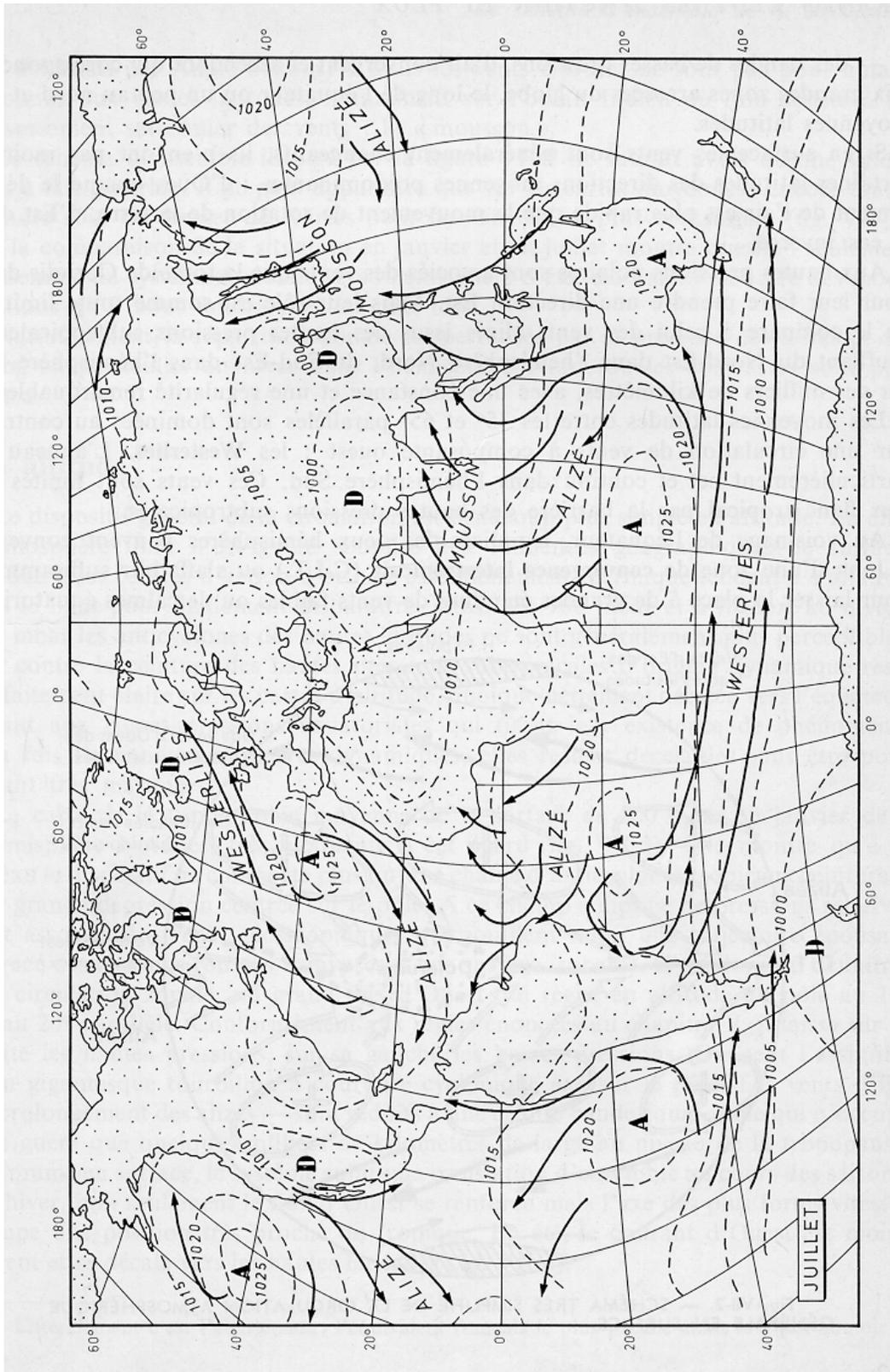


Figure X-14b RÉPARTITION MOYENNE DES PRESSIONS ET DES PRINCIPAUX FLUX À LA SURFACE DU GLOBE-Juillet. Les pressions sont données en mbar. Source: Estienne et Godard 1970.

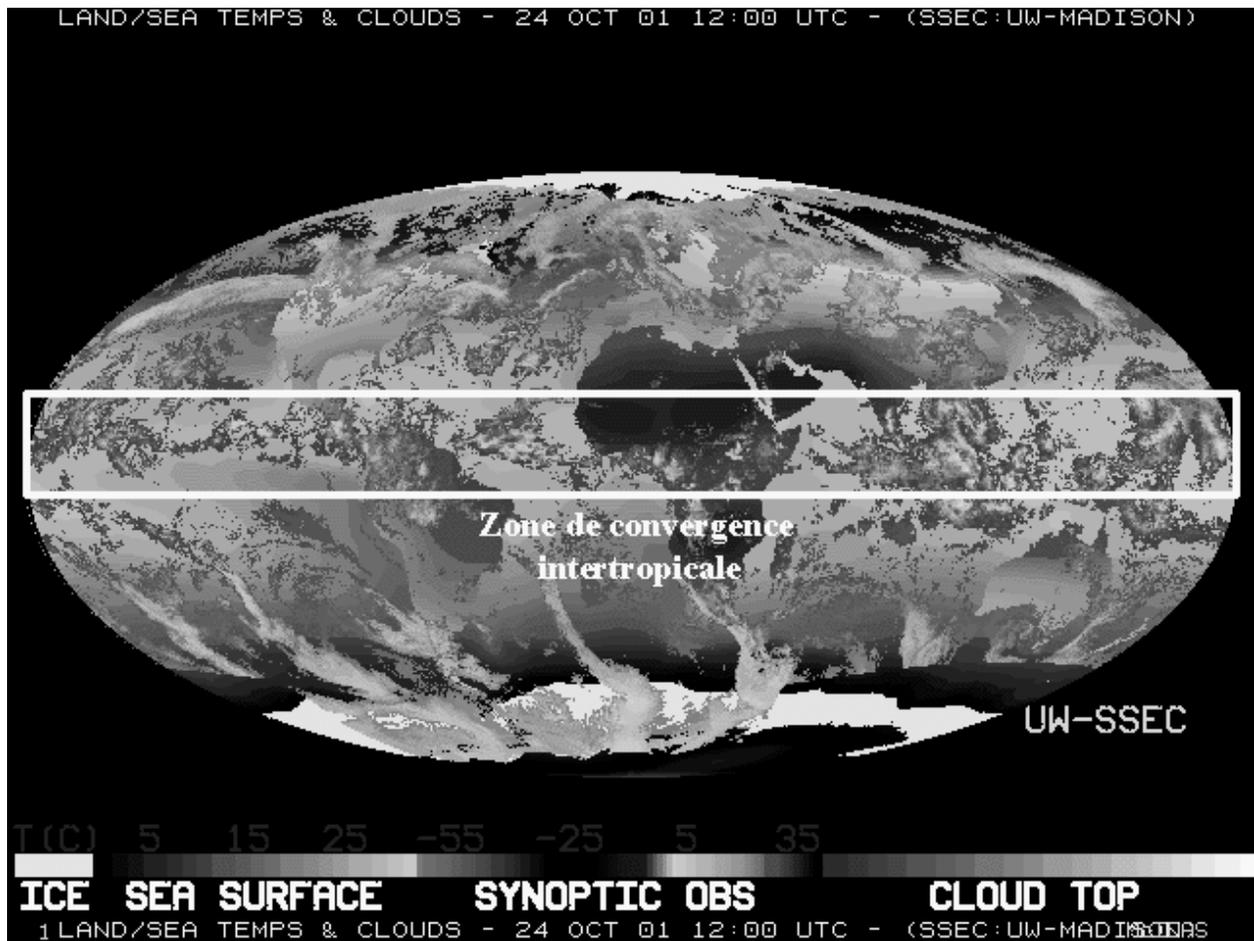


Figure. X-15: Image satellite du globe. On peut très bien observer les nuages associés à la zone de convergence intertropicale (encadrée) et la zone dégagée au nord et au sud (anti-cyclones sous-tropicaux).

En conclusion

Pour conclure, il est évident que plusieurs points de la circulation générale dans l'atmosphère restent à éclaircir, mais, comme l'expérience du bassin tournant le démontre, la non-uniformité de la température à la surface de la Terre et la rotation de celle-ci sont les 2 principaux facteurs qui l'influencent. La présence d'un gradient de température est nécessaire pour mettre en mouvement le fluide, alors que l'imposition d'un taux de rotation notable au bassin est nécessaire pour obtenir un patron de circulation semblable à celui de la Terre. On peut ainsi affirmer que le déplacement de l'air à l'échelle du globe est en quelque sorte une réaction de l'atmosphère face à l'inégalité de l'insolation de la surface terrestre, visant à répartir cette chaleur tant sur le plan horizontal que sur le plan vertical. Quant à la rotation de la Terre, elle est responsable, pour sa part, de la modulation de la circulation atmosphérique à l'échelle du globe parce que cette rotation empêche la circulation thermique directe comme dans le cas de la brise de mer.