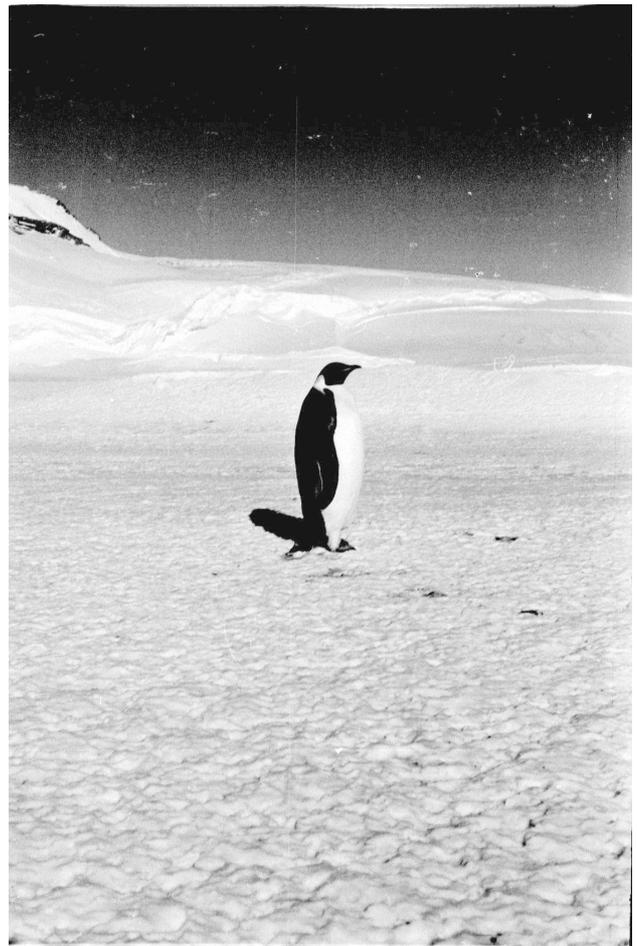


Température moyenne de la surface de la terre

v2

Cumul thermique



Y a-t'il réchauffement climatique ? Il semble que oui, mais la vitesse du changement n'est pas facile à établir. Comment établir la température moyenne de la terre ? Quel doit être le maillage de stations météo pour avoir une représentation crédible de la température moyenne ? Doit-on tenir compte de la capacité calorifique des océans, du réchauffement du permafrost (émissions de méthane) et de la fonte des pôles ?

Les réponses sont en partie dans ce rapport :

<http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-chapter3.pdf>

L'incertitude sur le calcul de la moyenne à partir d'un maillage très lâche dans certaines parties du globe (déserts, antarctique, océans, très hautes montagnes...) et d'un nombre de stations variable dans le temps semble inférieure à la valeur du réchauffement. Possiblement !

L'homme a-t'il une part de responsabilité ? Les avis sont partagés et polémiques. La nature elle-même peut avoir un impact considérable (une éruption majeure, El Nino, [activité solaire particulière](#)...). On peut supposer qu'une faible responsabilité humaine amplifie le phénomène si celui-ci est dû principalement à des causes naturelles. Par exemple, un réchauffement de la Sibérie accru de quelques centièmes de degrés du fait des activités humaines peut précipiter le dégel du permafrost et la libération de grandes

quantités de méthane (considéré comme 20 fois plus actif que le CO2 comme effet de serre). Si la responsabilité humaine est plus importante, alors l'effet serait alors exponentiel.

Quelles peuvent en être les conséquences pour l'homme ? La désertification (incendies), la submersion des grands deltas (problème de gestion de population), des météores extrêmes (cyclones, tornades, inondations,...), les guerres de l'eau, les ressources halieutiques (l'eau douce dans la mer), la biodiversité, les épidémies (déplacements d'insectes), les fragilités sanitaires...

Peut-on inverser la tendance ? Notre responsabilité est de prendre des précautions, de diminuer CO2 et méthane, mais aussi nos consommations, en croisant les doigts pour que cela suffise à maintenir notre planète habitable pendant «l'éternité humaine».

On peut noter que la mise en oeuvre des précautions face aux risques peut générer de nombreux emplois. Encore faut-il organiser un système économique cohérent avec un futur par essence incertain.

Concernant les phénomènes liés à la météo :

- Peut-on estimer le volume de glace ayant disparu sur les terres englacées depuis la mémoire d'homme ? (99% de la glace est en Antarctique et au Groeland - le % restant serait dans les glaciers d'altitude) - http://fr.wikipedia.org/wiki/Recul_des_glaciers_depuis_1850
- Peut-on estimer l'élévation du niveau des océans si toute la glace émergée venait à fondre ? Certains parlent de 70m (à raison de 4mm par an dans une hypothèse haute). Pour mémoire, la grotte Cosquer fut habitée il y a environ 20 000 ans, alors que son ouverture se trouvait à 37 mètres au-dessous du niveau actuel de la Méditerranée... Et l'Angleterre n'était pas une île. Il y a 10 000 ans, le Sahara était marécageux et verdoyant...
- Peut-on évaluer les conséquences de la disparition des glaciers d'altitude (irrigation,...), dont il est difficile de prévoir l'avance ou le recul ?



Un peu d'épistémologie

Le mathématicien, controversé par les lanceurs d'alerte climatique, écrit plusieurs réflexions (hors de la controverse) :

"Dès que le travail devient un tant soit peu conséquent, les erreurs sont inévitables. Or la plus redoutable est moins l'erreur qui empêche le programme de fonctionner que celle qui, tapie dans l'ombre, laisse croire que le programme est correct". (Benoît Rittaud - Le mythe climatique)

«Climatomancie : art divinatoire visant à déduire du comportement humain l'avenir climatique de la Terre, dans l'idée de prescrire à chacun des actions de pénitence.» (Ibidem)

"L'énoncé "je ne sais pas", lorsqu'il est dit de façon honnête, est toujours scientifique". (Ibidem)

De son côté, Emile Borel, lui aussi mathématicien, écrit ceci :

«L'utilité d'un aléa ne se confond pas en général avec son espérance mathématique.»

Le maniement des données est un art délicat. Plus le logiciel est complexe, plus il a de chances de contenir des erreurs de raisonnement ou de programmation difficiles à déceler. Pour la température, dont les extrêmes peuvent être -90°C et $+50^{\circ}\text{C}$ et donc l'objectif est de calculer une variation de quelques centièmes de degrés sur des milliers de stations inégalement réparties (a-t'on déjà défini ce que pourrait être une équirépartition sur la terre compte tenu de la grande variété d'environnement (océans entre 0 et 8000m de profondeur, sur plus de la moitié du globe, calottes glacières, relief entre 0 et 8000m, permafrost, désert,...). Le nombre de stations croit, certaines stations dérivent, d'autres sont en panne ou ne sont plus maintenues et jusqu'à récemment les relevés étaient manuels, à intervalle variable (toutes les 3 heures sauf la nuit,...)

Le calcul de la moyenne reste donc statistique et dépend de la taille de l'échantillon.

Avec les stations numériques, il faut manipuler les données en sachant que :

- les températures ont un cycle diurne superposé à un cycle annuel : la donnée individuelle doit reproduire la variation de la température dans la journée et l'analyse doit se faire sur un nombre d'année statistiquement représentatif.
- qu'il est important de se situer au-dessous ou en dessous de 0°C : les phénomènes naturels sur la surface terrestre ne sont pas comparables sur toute l'échelle de variation. Il est aussi possible qu'il existe un seuil de température dans les océans (seuil de formation des cyclones...).
- que la température n'est qu'un marqueur et non une grandeur arithmétique signifiante. On ne peut pas donner d'explications concrètes à des opérations arithmétiques (addition, division,...) avec la température. La température moyenne est un concept abstrait, sans signification concrète. Cette abstraction a l'inconvénient

majeur de permettre des erreurs de raisonnements subtiles. Pour éviter ces erreurs, il convient de définir un indicateur concret qui soit une grandeur arithmétique.¹

Un indicateur thermique arithmétique

La température de l'air, celle du sol, le point de rosée ou la température ressentie sont des grandeurs caractéristiques qui ne traitent pas tous les aspects thermiques.

Les températures moyenne, maximale et minimale d'un jour, d'un mois, d'une année ou d'une décennie sont des statistiques intéressantes pour suivre l'évolution d'un climat.

Le gradient de température, c'est à dire la vitesse à laquelle la température monte ou descend satisfait notre curiosité dans le temps réel. Il serait sans doute intéressant de comparer les gradients passés : la distribution des gradients sur les 100 dernières années, année par année, pourrait révéler autrement l'évolution du climat.

Les plantes, curieusement savent compter : pour se développer, la plante a besoin d'une certaine quantité de chaleur. Puisque l'on s'intéresse au réchauffement climatique, pourquoi ne pas s'inspirer de la nature ?

Au lieu de mesurer la température, il s'agit de mesurer les effets de la température. Ceux-ci peuvent s'additionner : la quantité de chaleur est une grandeur arithmétique. Une quantité de chaleur peut s'additionner à une autre quantité de chaleur. Plus la température est haute, plus l'énergie calorifique apportée à la terre est grande. Inversement, plus la température est basse, plus la terre cède de calories.

La quantité de chaleur peut conduire aux calories, mais oblige à y associer la densité d'un solide ou d'un gaz. La quantité de chaleur peut aussi introduire la notion de cumul thermique, qui est une approche statistique concrète selon le principe suivant :

Le cumul thermique

La température est mesurée toutes les heures. Le cumul thermique d'une journée est la somme des 24 températures mesurées aux heures justes (première mesure à 0h00).

Mathématiquement, le cumul apparaît comme 24 fois la température moyenne de la journée. Au lieu d'utiliser le mot température, on utilise l'expression «cumul thermique» qui représente une quantité de chaleur virtuelle.

Le cumul thermique peut être considéré comme un indicateur de ce que la terre reçoit du soleil en un jour. Le cumul peut aussi être réalisé pour établir le jour moyen d'un mois donné, ou le jour moyen d'une année donnée pour regarder facilement l'évolution thermique de la surface de la terre sous un angle quantitatif là où le marqueur de température définit une qualité.

¹ Pour illustrer les confusions entre marqueur et grandeur, l'heure : l'heure au sens d'horodate ne peut pas s'additionner à une autre horodate. Par contre, l'heure, au sens de durée est une grandeur arithmétique.

Le cumul thermique d'un jour est représenté par 24 données horaires qui représentent bien le cycle diurne (en particulier pour observer les variations rapides en début ou en fin de journée ou en cours de journée pour déceler l'arrivée d'un front froid ou chaud). Cependant, la plupart des stations n'offrent, en données historiques essentielles (OMM) que des valeurs tri-horaires. Le lissage résultant est moins représentatif, mais sur une longue période, on peut admettre qu'il est statistiquement satisfaisant. Le cumul thermique de la journée est alors la somme de chaque valeur tri-horaire multipliée par trois (pour normer à 24). Par ailleurs, les stations type Weatherground, offrent une température moyenne quotidienne, qui, multipliée par 24, donne le cumul thermique de la journée.

Cette somme simple peut prêter à débat, mais plus on compliquera la méthode, plus le résultat sera décrédibilisé.

Le cumul est une somme arithmétique. Les valeurs négatives sont soustraites aux valeurs positives. Les jours très froids peuvent donc avoir un cumul thermique négatif. Il est toujours possible de changer la référence pour mieux situer l'équilibre des échanges, par exemple pour se situer autour de 15°C qui est la température moyenne admise pour un pays tempéré. L'essentiel est de préciser cette référence lorsqu'elle est différente du zéro.

Cette notion de cumul thermique sert par exemple à déterminer les quantités de chaleur reçues par une plante dont on connaît la température au-dessus de laquelle elle peut se développer ou pour prédire la date de floraison ou le pic de population d'un insecte.

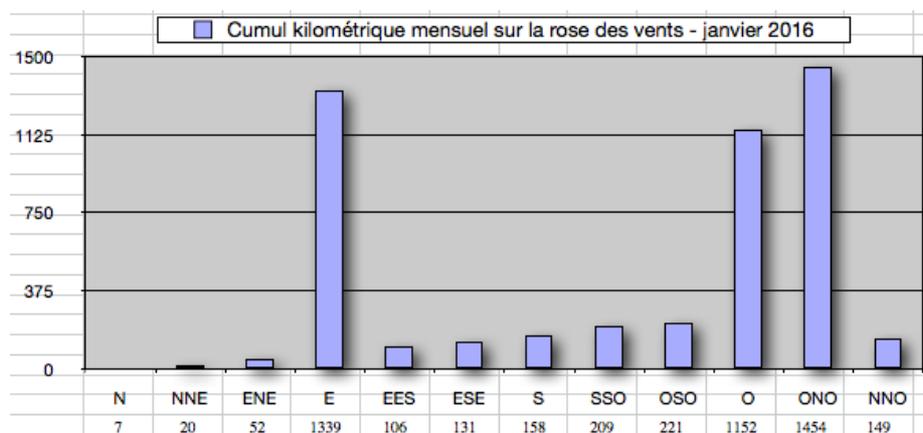
<http://www.agrireseau.qc.ca/Rap/documents/b03pom12.pdf>

Elargie à l'homme, le cumul thermique permet de prédire des consommations électriques (la compensation des calories solaires) ou hydrauliques (compensation de l'évaporation) ou les achats de vêtements légers ou chauds. Elargie au climat, le cumul thermique peut aider à surveiller les évolutions sur de longues périodes (le cumul thermique peut aussi être calculé a posteriori).

Cumul venteux

Le cumul venteux, comme le cumul thermique, est un concept artificiel : si la station mesure un vent de 36km/h pendant une heure, on peut supposer que chaque molécule d'air aura parcouru virtuellement 36 km, donnant ainsi une idée de la masse d'air déplacée pendant l'heure considérée. Le cumul venteux selon la direction des vents permet d'estimer les volumes d'air échangés dans toutes les directions. En y associant la température on pourrait estimer les masses d'air et les transferts caloriques. D'une année sur l'autre, il est intéressant de comparer mois par mois (saison par saison) les transferts d'air et de calories locaux. Le cumul venteux, qui est mathématiquement équivalent à une distance, représente virtuellement un volume d'air (selon la section choisie pour le flux). La densité de l'air (un peu plus de 1kg/m³) variant peu avec l'humidité et la

température, on peut aussi dire que le cumul venteux pour une section de 1 m² est approximativement, en kg, la masse de l'air transporté.



Le cumul venteux directionnel est obtenu à partir de la vitesse moyenne de chaque demi-heure sur un mois, mesurées en m/s et multipliées par 1,800 pour obtenir le nombre virtuel de kilomètres qu'une particule de vent aurait parcouru selon chacune des 12 directions de la rose des vents.

Chaque direction de la rose des vents (Nord, nord-nord-est, est-nord-est,...) est définie par un secteur de 15° de chaque coté.

Sur cet exemple, le mistral (en additionnant ouest et ouest-nord-ouest) à balayé environ 2700 km, tandis que le vent d'est ne balayait que 1340 km.

Transfert calorique

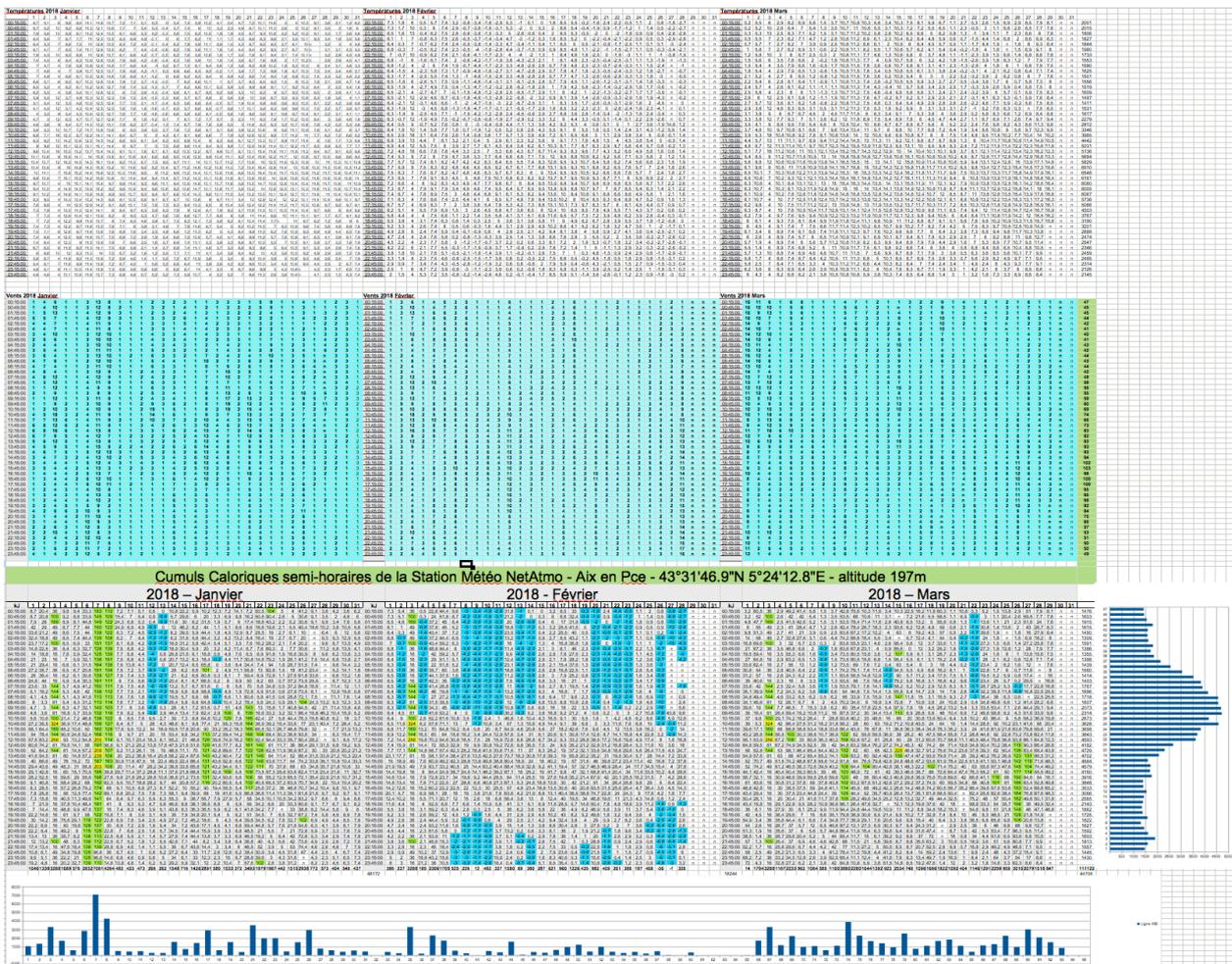
Le cumul thermique et le cumul venteux permettent d'estimer le transfert calorique sur la période de temps considérée.

Cumul calorique

Le cumul calorique essaie de représenter l'énergie qui s'est échangée au cours du temps au niveau de la station : l'air qui passe dans une section de 1m² à la vitesse de 1m/s représente 1m³ soit une 1,225 kg/m³ (au niveau de la mer à 15 °C), approximée à 1kg pour simplifier, soit une énergie de 1kJ (239 calories) par °C.

Le cumul calorique est donné comme le produit de la température par la vitesse du vent pour une tranche de temps donnée. Le calcul est fait pour chaque demi-heure (un m³ d'air propulsé à 3,6 km/h fait 1800m dans la demi-heure) et cumulé sur les 48 demi-heures de chaque jour, puis sur tous les jours du mois pour poser une valeur mensuelle. En cas d'absence de mesures, le cumul de la journée est extrapolé "au pifomètre".

Le concept de cumul calorique prétend seulement évaluer l'évolution des échanges de calories sur plusieurs années.



La zone supérieure est la température, la zone en-dessous est le vent et la zone inférieure est le cumul calorique : Rouge >1000J ; 800<rose<600 ; 600<orange<400; 400<jaune<200 ; 200<vert<100 ; 100<blanc<0 ; Blanc <0 ; 0<bleu<-100 ; violet<-100

Le graphe inférieur est le cumul de la journée

Le graphe à droite est le cumul selon l'heure de la journée.

Mesurer le réchauffement climatique

Dans l'optique de suivre le réchauffement climatique, le cumul thermique est à établir annuellement, à partir des valeurs horaires (qui sont cohérentes avec la prise en compte du cycle diurne), avec une référence à 0°C (on peut débattre de cette référence si l'on considère que l'océan est prépondérant dans la régulation thermique de la terre et qu'un océan ne gèle pas en profondeur. Il sera toujours temps de refaire les calculs avec une autre référence).

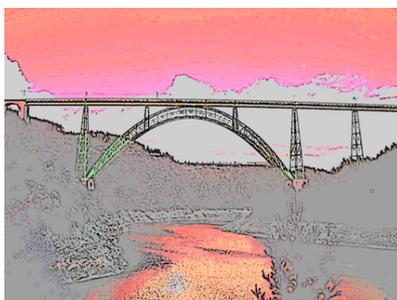
La valeur annuelle définissant un bilan thermique de la surface de la terre peut être la moyenne des cumuls thermiques annuels de toutes les stations retenues pour le calcul. Les comparaisons annuelles se font sur un panel de stations identique.

Sur une région homogène climatiquement, sur plusieurs stations identifiées, il devient possible de faire la moyenne de leur cumul thermique de chaque année.

Si l'on rajoute une station au panel d'une région - ce qui augmentera la représentativité des mesures agrégées - il faut d'abord analyser sur plusieurs années ses écarts par rapport à la moyenne des stations du panel et déterminer la raison de ses écarts, afin d'éviter d'ajouter des données disparates. Après commence la cuisine mathématique qui permet à la station de s'intégrer au panel sans le défigurer. La loi de pondération à lui appliquer sera alors pérennisée.

Lorsque le maillage des stations est trop large, la moyenne harmonique semble intéressante pour lisser des valeurs très différentes. Il sera intéressant de comparer moyenne arithmétique et moyenne harmonique sur des valeurs historiques de plusieurs dizaines d'années, car toutes les régions n'ont pas le même impact sur l'ensemble de la terre. Chaque station est représentative d'une superficie climatique permettant de pondérer l'importance de ses mesures.

Pour délimiter les régions climatiquement homogènes, c'est à dire celles dont les températures les plus froides et les plus chaudes sont comparables, plusieurs méthodes sont envisageables. Une cartographie coloriant toutes les stations terrestres maritimes identifiées selon les cumuls thermiques des mois les plus chauds et des mois les plus froids devrait permettre de préciser des frontières climatiques et d'identifier les différents types de régions.



Conclusion

Le cumul thermique est une notion provocatrice. Laissons les climatologues à leurs classicisme, mais proposons à tous ceux qui disposent d'une station météo numérique de générer des [tableaux de cumuls thermiques horaires/annuels](#) : en abscisse les jours de l'année, en ordonnée, les heures de la journée et dans chaque cellule la valeur de la température, cellule colorée selon la valeur. Ajoutons en dessous du tableau une ligne comprenant la somme de chaque colonne pour obtenir le cumul thermique de chaque jour et à droite du tableau une colonne comprenant la somme de chaque ligne pour obtenir le cumul thermique de chaque heure de la journée sur un an (divisé par 365 pour avoir le cumul thermique moyen de l'heure considérée).

Annexes

Superficies terrestres (approximatives) comparées

	km2
terre	510 000 000
océans 70%	360 000 000
terres émergées	150 000 000
antarctique	14 000 000
Afrique	30 000 000
Afrique sahélienne	10 000 000
Russie	17 000 000
Canada	10 000 000
Chine	10 000 000
USA	10 000 000
Brésil	9 000 000
Australie	8 000 000
Inde	3 000 000
Europe	5 000 000
Groenland	2 000 000
France métrop	540 000

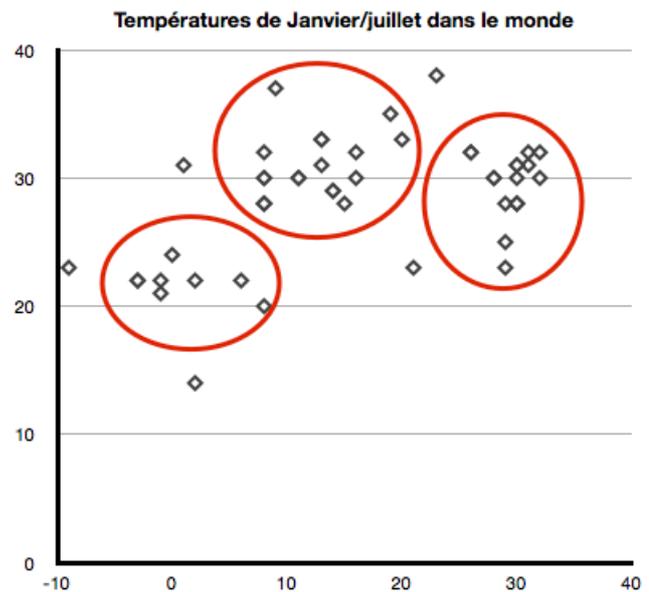
Importance de l'Afrique sahélienne

Afrique	Nord	Soudan sahélien	Golfe Guinée	Centre	Est	Sud	Îles océar Indien	AFRIQUE
km2	5 752 890	8 587 030	2 119 270	5 328 660	2 924 970	4 736 260	591 760	30 040 840
%	19	28	7	18	10	16	2	100
Habitants	152.4	113.0	196.1	94.5	184.8	107.3	20.0	868.1
%	18	13	23	11	21	12	2	100
%ruraux	48	66	54	62	76	57	72	61
habitants/km2	26	13	93	18	63	23	34	29
%Agriculteurs	28	72	40	62	79	46	69	55
km2 cultivables	653 200	2 082 560	1 198 600	1 730 600	828 534	1 136 787	83 070	7 713 351
km2 cultivés	280 282	387 640	549 640	213 030	308 690	329 500	37 950	2 106 732
%cultivés	43	19	46	12	37	29	46	27

Source : <http://www.fao.org/docrep/009/a0232f/a0232f07.htm>

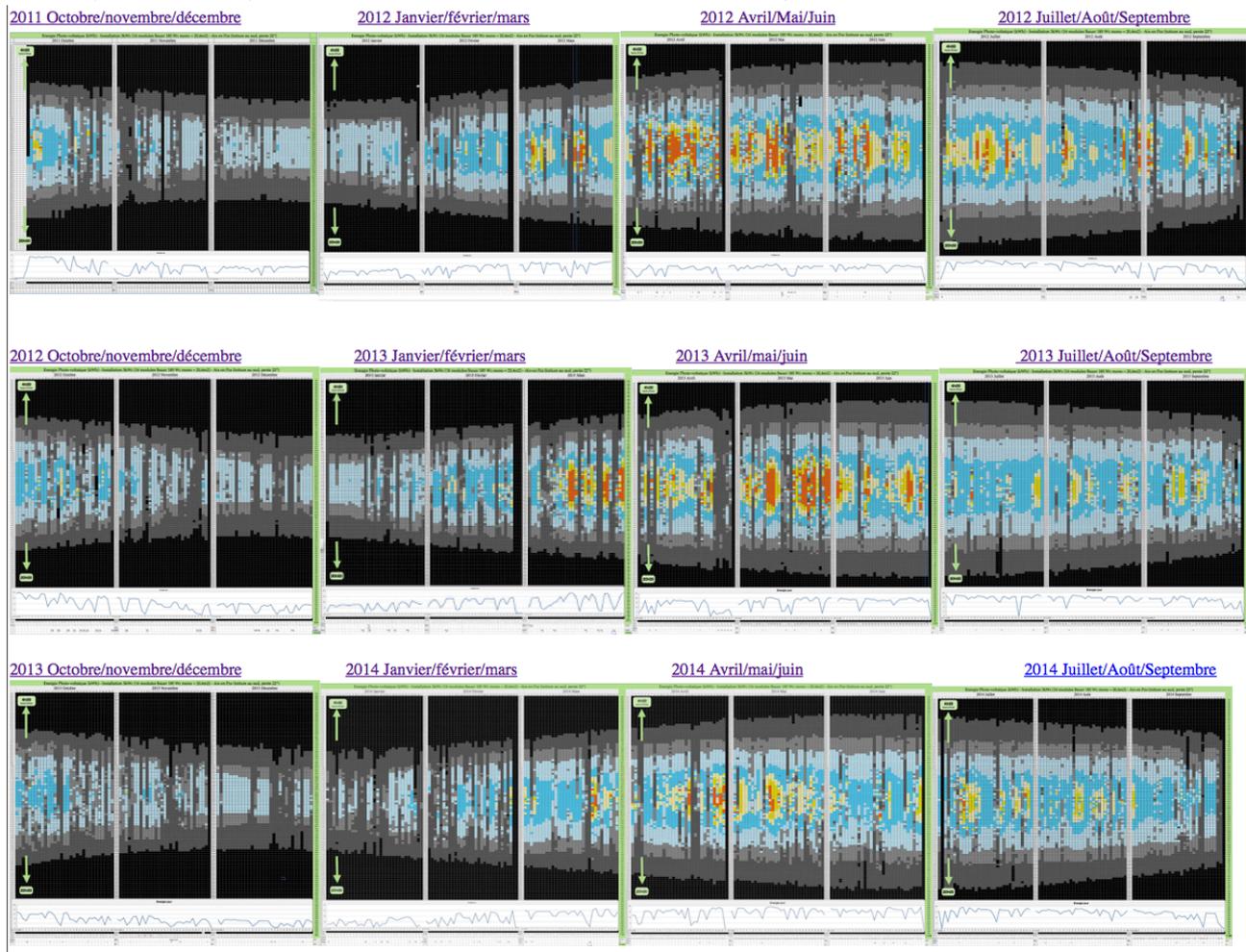
Exemple de recherche de régions climatiquement homogènes

Villes	Janvier	Juillet
Monde		
Acapulco (Mexique)	31	32
Athènes (Grèce)	13	33
Bora Bora	30	28
Cuba	26	32
Djerba (Tunisie)	16	32
Helsinki (Finlande)	-3	22
Istanbul (Turquie)	8	28
Le Caire (Egypte)	19	35
Madrid (Espagne)	8	30
Mexico (Mexique)	21	23
Nouméa (Nouvelle Calédonie)	29	23
Palma	14	29
Papeete (Polynésie française)	30	28
Pointe-à-Pitre	28	30
Port Victoria (Seychelles)	29	28
Rome (Italie)	11	30
Saint-Denis (Réunion)	29	25
Europe		
Athènes	13	33
Copenhague	2	22
Dublin	8	20
Faro	15	28
Helsinki	-3	22
Istanbul	8	28
Londres	6	22
Madrid	8	30
Moscou	-9	23
Palerme	16	30
Palma	14	29
Prague	0	24
Reykjavik	2	14
Rome	11	30
St-Petersbourg	-1	21
Stockholm	-1	22
Asie		
Abu Dhabi	23	38
Bali	31	31
Bangkok	32	32
Bombay	28	30
Calcutta	26	32
Colombo	30	28
Hanoi	20	33
Jérusalem	13	31
Les Maldives	30	30
Manille	30	31
Pékin	1	31
Rangoon	32	30
Shanghaï	8	32
Singapour	30	31
Téhéran	9	37
Tokyo	8	28



Source : <http://perso.inooi.com/v2/fr/meteo/meteo.php>

Graphe de production d'une toiture photovoltaïque



Cet ensemble de graphes peut être adapté à la visualisation des cumuls thermiques. Cette illustration propose 150 000 valeurs d'un seul coup d'oeil, permettant de comparer d'une année sur l'autre tout autant que d'un jour à l'autre la production solaire.

Adapté au cumul solaire mesuré par une station météo :

- en ordonnées : 24 valeurs horaires, avec une échelle de couleur,
- en abscisse : 4 trimestres de 3 mois de 28-31 jours pour faire
- par ligne : une année de mesure
- dans la colonne à droite de chaque trimestre : le cumul trimestriel horaire
- Sous chaque graphique :
 - la valeur et la courbe des cumuls quotidiens
 - la quantité des précipitations
 - le cumul venteux quotidien (même principe que le cumul thermique)
-