L'INDICE ACTUARIEL CLIMATIQUE
ÉCHANTILLONS DE CALCULS

ACTUARIES CLIMATE INDEX
INDICE ACTUARIEL CLIMATIQUE

American Academy of Actuaries
Objective. Independent. Effective.™

Canadian Institute of Actuaries / Institut canadien des actuaires

CAS

SOCIETY OF ACTUARIES

Table des matières

Introduction 1

1. Sécheresse 3

2. Niveau de la mer 6

3. Précipitations 11

4. Températures élevées 16

5. Températures basses 21

6. Puissance éolienne 25

L'Indice actuariel climatique 29

l'Indice actuariel climatique

Échantillons de calculs

Le présent document a pour but de présenter des exemples de calculs pour chaque composante de l'Indice actuariel climatique (IAC) dans un endroit géographique particulier. Ces exemples de calculs illustrent l'ampleur des valeurs selon la composante et les répercussions de certains calculs intermédiaires qui soustendent l'indice.

La méthode à la base de l'IAC est présentée en détail dans le document intitulé *L'Indice actuariel climatique – Développement et conception*. Cet indice est constitué de six composantes (énumérées par ordre de complexité des formules) :

SÉCHERESSE	$MaxCDD_{std}(j,k)$	Nombre maximal de jours secs consécutifs (<1mm) par an
NIVEAU DE LA MER	$S_{std}(j,k)$	Niveau de la mer
PRÉCIPITATIONS	$MaxP^{(5\text{-day})}_{std}(j,k)$	Précipitations maximales sur cinq jours au cours du mois
TEMPÉRATURES ÉLEVÉES	$F\,T{:}warm_{std}(j,k)$	Fréquence des températures les plus élevées (au-dessus du 90^{e} percentile)
TEMPÉRATURES BASSES	$F\,T{:}cool_{std}(j,k)$	Fréquence des températures les plus basses (en dessous du 10^{e} percentile)
PUISSANCE ÉOLIENNE	$F\,WP_{std}(j,k)$	Fréquence des puissances éoliennes les plus fortes

où « j » indique le mois et « k » indique l'année.

Les calculs de chaque composante mesurent la variation par rapport à la période de référence de 30 ans (1961 à 1990) sous forme standardisée. La durée de la période de référence a été choisie comme étant l'étendue des conditions qui définissent couramment le climat. Pour chaque composante, l'anomalie standardisée représente la différence entre la période actuelle et la période de référence, et elle est ensuite étalonnée en la divisant par l'écarttype de la période de référence. Exprimée sous forme algébrique, cette anomalie est $(X-\mu)/\sigma$. Nous avons choisi d'exprimer chaque composante à titre d'anomalie standardisée principalement pour combiner de façon compatible les chiffres relatifs à des phénomènes très disparates – au plan de leurs unités de mesure et de leur variabilité d'un endroit à l'autre. Les variations sont comptées par écartstypes à partir d'une moyenne centralisée à titre d'unité pour toutes les composantes qui constituent l'IAC, c'estàdire les températures, le niveau de la mer, la puissance éolienne, la sécheresse et les précipitations. L'indice est défini par la moyenne des composantes standardisées, de sorte qu'il mesure un écart moyen par rapport à la moyenne du nombre d'écartstypes.

L'IAC est calculé sur une base mensuelle et saisonnière d'après des méthodes semblables. Il convient de noter que les indices saisonniers sont déterminés en considérant simplement les moyennes des valeurs mensuelles régionales non étalonnées et en appliquant la même méthode de standardisation que celle mentionée dans le paragraphe précédent. L'IAC saisonnier repose sur des saisons météorologiques, qui représentent des mois civils entiers plutôt que des saisons astronomiques fondées sur les dates des solstices et des équinoxes. Par exemple, l'hiver englobe les mois civils de décembre, janvier et février. Pour simplifier le présent document, les exemples de calculs ne portent que sur les séries mensuelles. Une mesure clé, la moyenne mobile sur cinq ans, est également présentée, car elle permet de bien visualiser les tendances.

L'indice est calculé à l'aide d'un ensemble de données présentées sous forme de grille, groupées pour les régions du Canada et des ÉtatsUnis. Chaque grille mesure une surface de 2,5 degrés de latitude sur 2,5 degrés de longitude. À l'équateur, une grille couvre une superficie d'environ 275 km sur 275 km; à 50 degrés de latitude, environ le milieu de la latitude du Canada et des ÉtatsUnis, une grille couvre une superficie de 275 km de latitude sur 180 km de longitude. Les valeurs propres à chaque grille reposent sur la moyenne des stations météorologiques et des stations de mesure du niveau de la mer dans la grille[1]. Les exemples de calculs qui suivent exposent le calcul en détail comme si une région ne comptait qu'une grille ou un seul endroit à l'intérieur d'une grille.

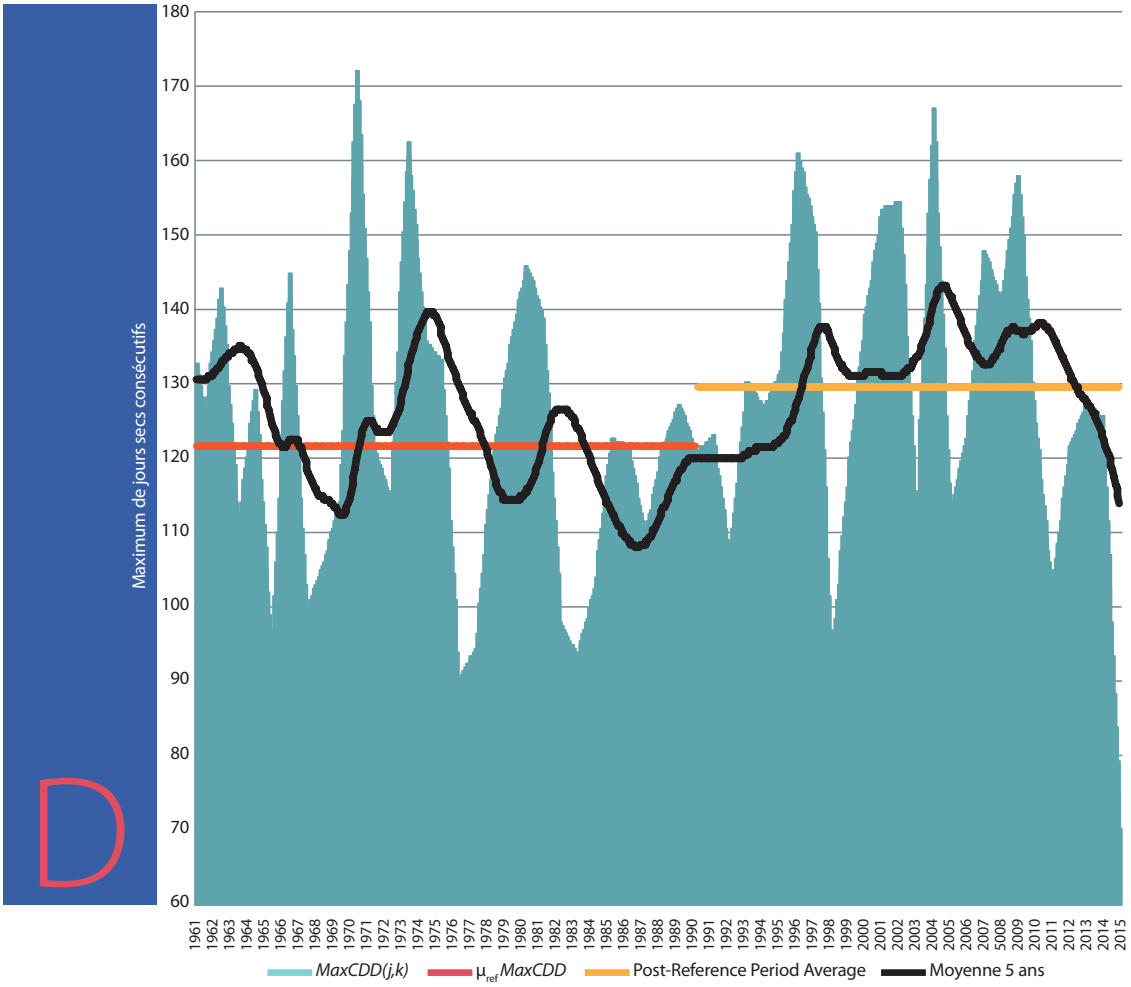
1 Le processus de calcul des indices régionaux varie légèrement d'une composante à l'autre. À l'exception du niveau de la mer, des moyennes sont établies pour les valeurs des composantes des stations à l'intérieur de chaque grille et elles sont ensuite groupées pour obtenir les moyennes de cellules de la grille. Puis, des moyennes sont calculées pour les moyennes des cellules de grille dans chaque région et elles sont ensuite groupées d'après la taille des grilles comme coefficients de pondération. (La taille de la grille est proportionnelle au cosinus de la latitude de son point central, et les cosinus sont utilisés à titre de coefficients de pondération.) Les écarts types de la période de référence sont ensuite calculés au niveau de la région à partir de la moyenne des observations régionales, et l'indice est calculé selon les anomalies des moyennes mensuelles ou saisonnières (par rapport à la moyenne de la période de référence) et les écarts types de la période de référence. Selon cette procédure, nous ne calculons pas les valeurs de l'indice au niveau de la grille, même si nous envisageons cette possibilité comme une amélioration future. Pour le niveau de la mer, une moyenne globale est établie pour les stations à l'intérieur de chaque région afin d'obtenir les moyennes régionales. Les écarts types et les valeurs de l'indice sont ensuite calculés au niveau régional, à l'instar des autres composantes.

1. Sécheresse

Les figures qui suivent représentent un modèle de grille de calcul de l'IAC pour la composante sécheresse centrée près de Barstow, dans le comté de San Bernardino Ouest au centresud de la Californie (à 35 degrés de latitude nord et 117,5 degrés de longitude ouest). La sécheresse est mesurée par le nombre maximal de jours secs consécutifs à chaque année k, *MaxCDD(k)*, où un jour sec est compté lorsque les précipitations sont inférieures à un millimètre. Les valeurs mensuelles sont obtenues pour chaque mois j, année k, par interpolation linéaire, où *MaxCDD(12,k)* = *MaxCDD(k)*. Pour d'autres valeurs de j, *MaxCDD(j,k)* = (12-j)/12 * *MaxCDD(12,k-1)* + j/12 * *MaxCDD(12,k)*. Les anomalies sont mesurées par l'écart du nombre maximal de jours secs consécutifs au cours d'un mois par rapport à la moyenne des valeurs de la période de référence mensuelle entre 1961 et 1990.

Figure 1.1. Maximum de jours secs consécutifs

Barstow, San Bernadino Ouest, centre-sud de la Californie



Le nombre maximal de jours secs consécutifs à chaque mois *j*, année *k, MaxCDD(j,k)*, est présenté à la figure 1.1 entre 1961 et 2015. On y trouve également la moyenne de la période de référence (1961 à 1990), μ_{ref} *MaxCDD(j)*, ainsi que la moyenne pour la période postréférence de 1991 à 2015, et une moyenne mobile sur cinq ans en pointillés mauves. *[Veuillez noter que les légendes des graphiques qui suivent sont présentées en anglais.]*

Puis est affichée l'anomalie des jours secs consécutifs (CDD), Δ*MaxCDD(j,k),* qui représente la différence entre *MaxCDD(j,k)* et la moyenne de la période de référence de 1961 à 1990, μref *MaxCDD*. L'ajustement des données *MaxCCD(j,k)* à l'aide de la moyenne de la période de référence μref *MaxCDD* se traduit par une anomalie zéro pour la période de référence moyenne. Le calcul est exprimé au moyen de la formule suivante :

$$\Delta MaxCDD(j,k) = MaxCDD(j,k) - \mu_{ref}\, MaxCDD$$

On y indique également la moyenne mobile sur cinq ans de Δ*MaxCDD(j,k)*.

Figure 1.2. Anomalie CDD

Barstow, San Bernadino Ouest, centre-sud de la Californie

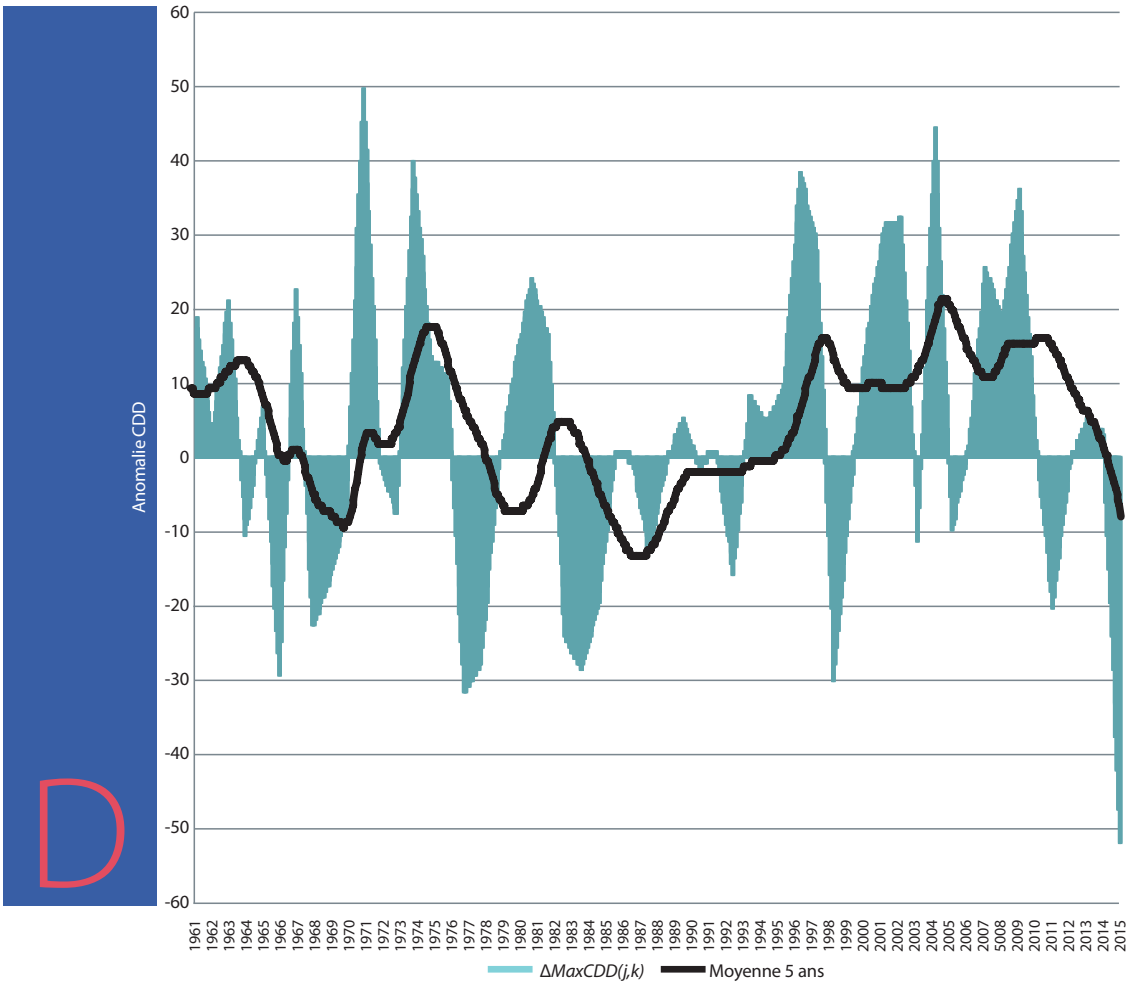
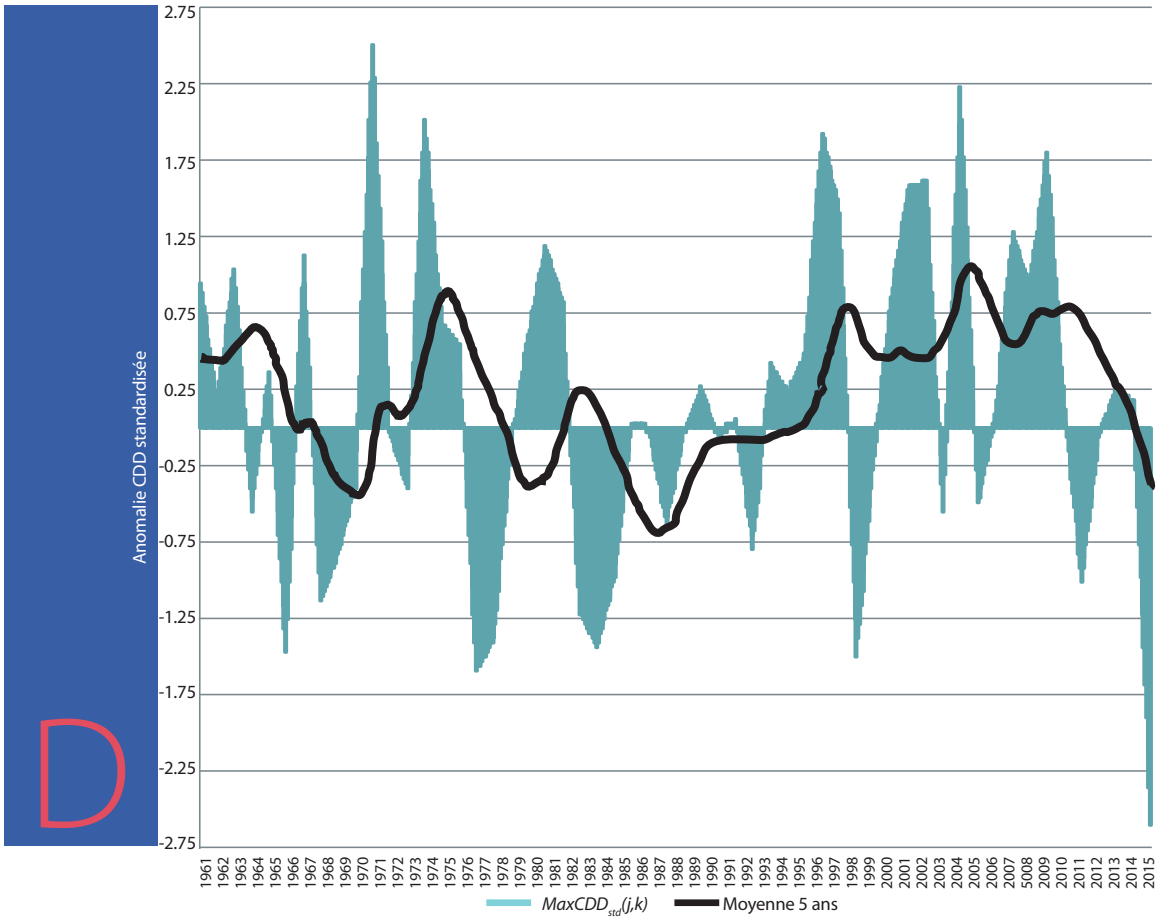


Figure 1.3. Anomalie CDD standardisée

Barstow, San Bernadino Ouest, centre-sud de la Californie



La figure 1.3 montre l'anomalie CDD standardisée, qui est l'anomalie CDD, $\Delta MaxCDD(j,k)$, divisée par l'écarttype de la période de référence, $\sigma_{ref}\, MaxCDD$.

Les calculs sont formulés ainsi :

$$MaxCDD_{std}(j,k) = \left[MaxCDD(j,k) - \mu_{ref}\, MaxCDD\right] / \sigma_{ref}\, MaxCDD$$

Les anomalies standardisées, de même que les moyennes mobiles sur cinq ans affichées dans les figures susmentionnées, indiquent les répercussions de la sécheresse en Californie, souvent analysées ces dernières années. L'augmentation des précipitations en 2015 n'a pas suffi à apaiser les préoccupations au sujet de la sécheresse, alors que de nouveaux problèmes liés aux coulées de boue et aux inondations ont surgi. Par contre, d'intenses tempêtes ont permis de rehausser le niveau des réservoirs.

2. Niveau de la mer

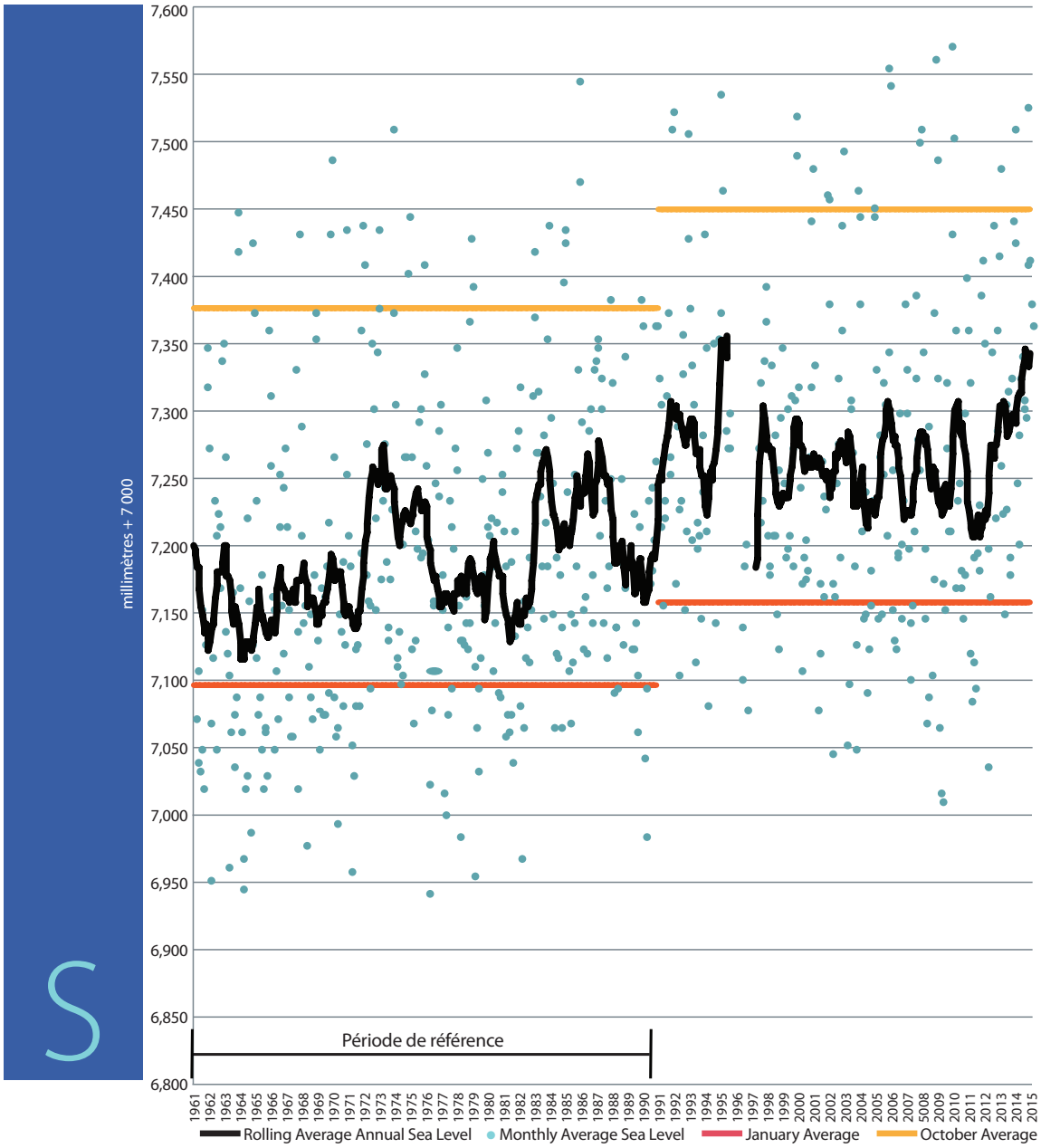
Les mesures du niveau de la mer (*S*) sont diffusées sous forme de moyenne mensuelle à l'aide de marégraphes répartis dans plus de 100 stations côtières permanentes au Canada et aux ÉtatsUnis[2]. Les moyennes mensuelles reposent sur des lectures horaires effectuées pendant tout le mois. Une procédure de contrôle de la qualité a permis d'éliminer bon nombre de ces stations côtières parce que les données étaient incomplètes (dossiers débutant après 1970, ou plus du tiers des valeurs moyennes mensuelles étaient manquantes), d'où un solde de 76 stations offrant des séries chronologiques fiables aux fins d'une analyse plus poussée. La station 112 à Fernandina Beach, en Floride, est un exemple de station présentant des données adéquates qui seront utilisées pour illustrer cette composante. Les données relatives à l'IAC sont compilées une fois par mois. Douze moyennes de référence du niveau de la mer, $\mu_{ref}\, S(j)$, et 12 écarts-types, $\sigma_{ref}\, S(j)$, sont calculés à partir des valeurs de la période de référence de $S(j)$, (p. ex., 30 valeurs pour janvier entre 1961 et 1990), semblablement à ce qui a été fait pour la composante de la sécheresse.

Les marégraphes mesurent le niveau de la mer par rapport à la croûte terrestre. Cette mesure comprend l'incidence des mouvements de la croûte. La masse terrestre peut monter ou descendre, ce qui exerce un impact sur l'augmentation du niveau de la mer. Le niveau de la mer est exprimé en millimètres (mm), et 7 000 mm sont ajoutés pour éviter les valeurs négatives. La figure 2.1 cidessous indique les points de données réels du niveau de la mer sous forme de cercles bleus – 12 valeurs par année. Les moyennes sont fournies pour les mois au cours desquels le niveau de la mer est à son plus bas niveau et à son plus haut niveau à cet endroit, c'estàdire janvier et octobre respectivement. Le niveau de la mer varie entre les saisons, selon la température et la salinité de l'eau, de même qu'en fonction des mouvements de la croûte, des courants marins, des précipitations, de l'évaporation et de la lenteur de l'absorption et de la libération de chaleur par l'eau.

2 Permanent Service for Mean Sea Level, « Obtaining Tide Gauge Data », consulté le 11 novembre 2016.

Figure 2.1. Moyenne du niveau de la mer annuel

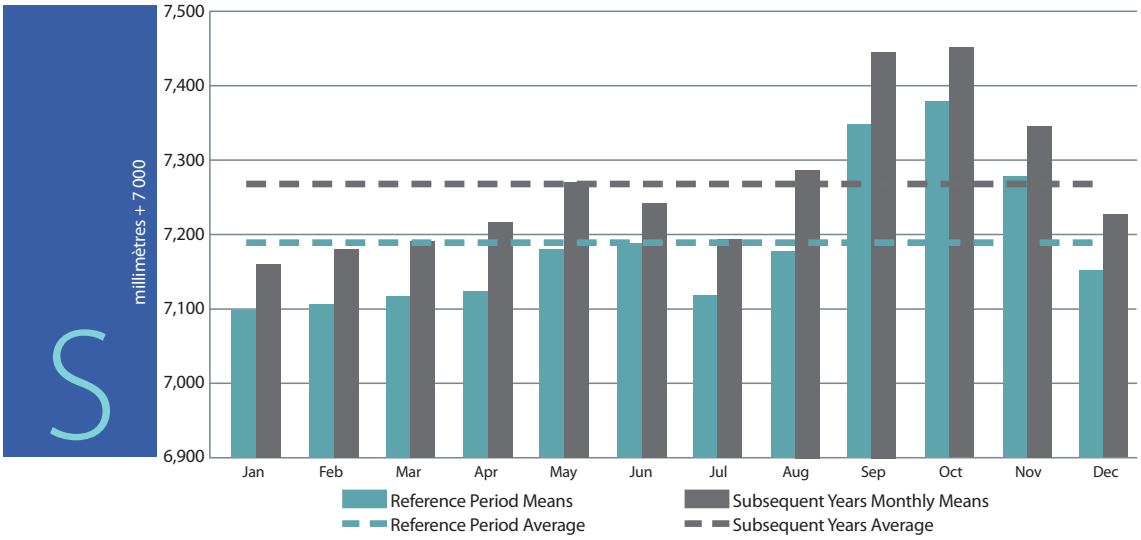
Fernandina Beach, Floride



Les moyennes mensuelles de référence du niveau de la mer, μref *S(i)*, et les écartstypes, σ_{ref} *S(i)*, sont affichés à la figure 2.2. Le graphique montre les moyennes de la période de référence selon le mois et globalement par rapport aux années subséquentes. Ces moyennes sont plus élevées à chaque mois à cet endroit.

Figure 2.2. Moyenne mensuelle du niveau de la mer

Fernandina Beach, Floride



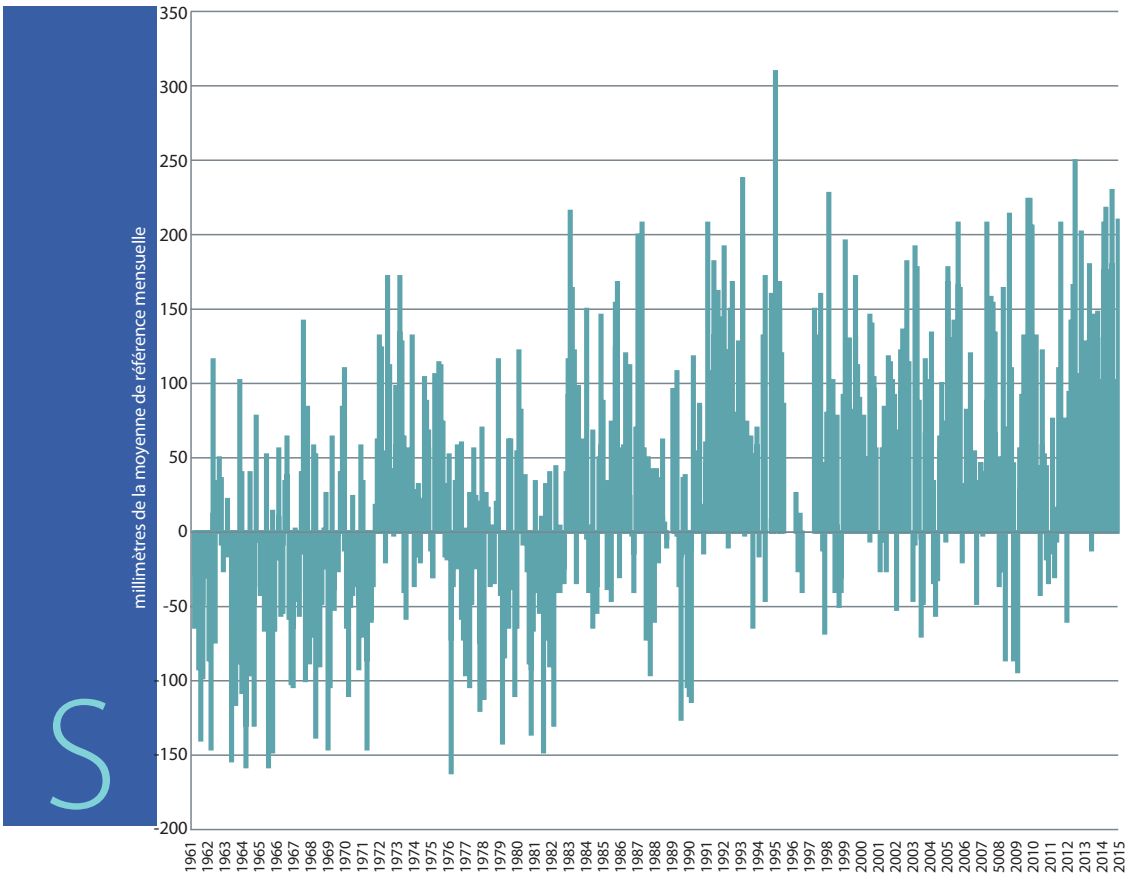
Mois(j) :	Janv.	Févr.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juill.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
$\mu_{ref} S(j)$	7 097,4	7 104,6	7 115,0	7 124,4	7 179,5	7 189,0	7 119,0	7 177,3	7 346,1	7 377,6	7 277,4	7 152,8
$\sigma_{ref} S(j)$	93,9	90,1	82,3	53,8	64,7	81,1	60,5	59,8	60,8	77,2	75,7	71,2

Pour $S(j,k)$, le niveau de la mer au mois i et à l'année k, l'anomalie $\Delta S(j, k)$ est formulée ainsi :

$$\Delta S(j,k) = S(j,k) - \mu_{ref} S(j) \qquad \text{pour les mois } j = \text{Janv., Févr., Mars, …, Déc.}$$

Figure 2.3. Anomalies mensuelles du niveau de la mer

Fernandina Beach, Floride

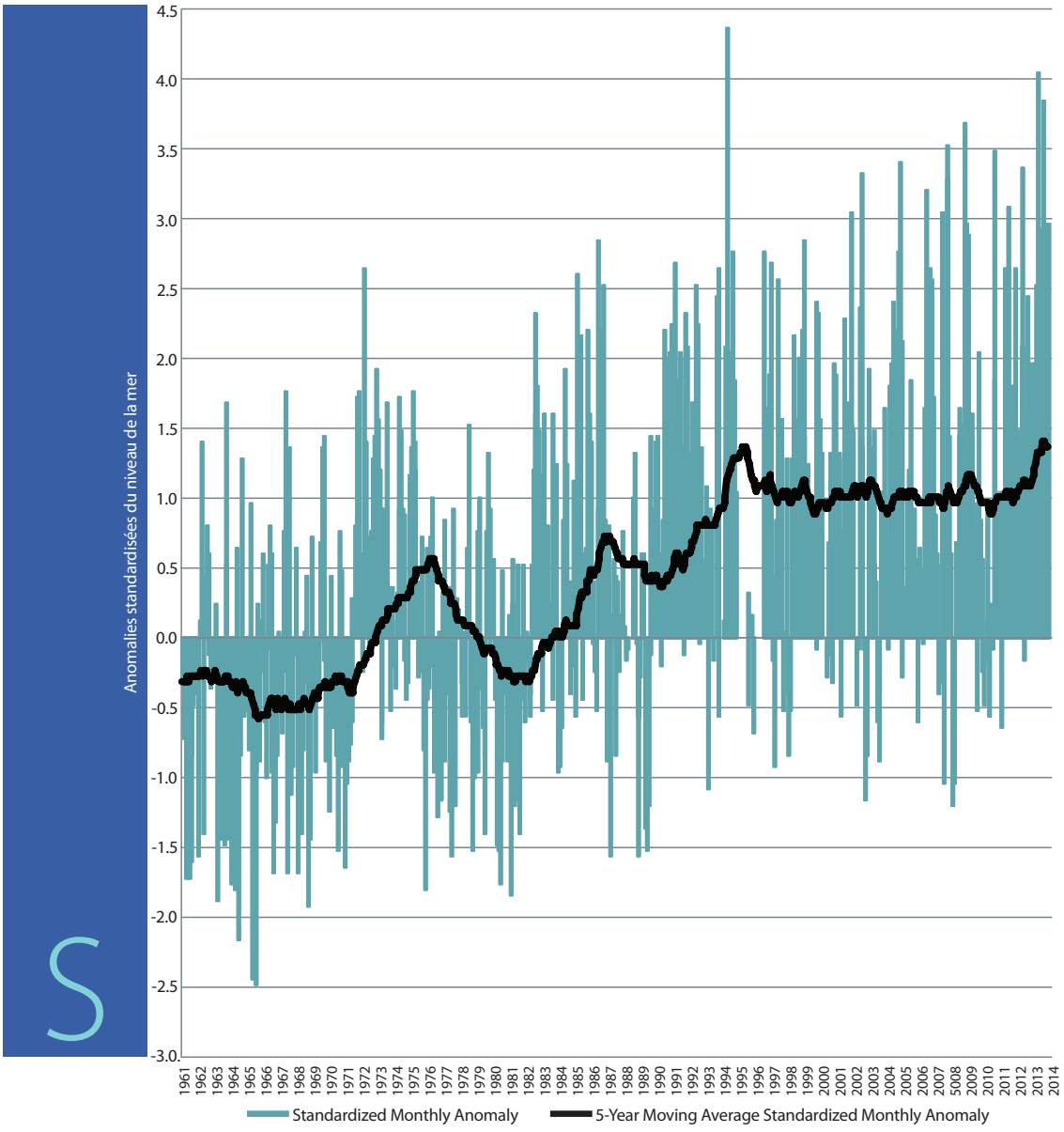


Les anomalies du niveau de la mer $\Delta S(j,k)$ sont ensuite standardisées au moyen de l'équation suivante :

$$S_{std}(j,k) = [S(j,k) - \mu_{ref} S(j)] / \sigma_{ref} S(j)$$
$$= \Delta S(j,k) / \sigma_{ref} S(j)$$

Figure 2.4. Anomalies standardisées du niveau de la mer

Fernandina Beach, Floride



3. Précipitations

La composante des précipitations insiste sur les valeurs extrêmes plutôt que sur les précipitations moyennes, à l'aide des séries temporelles des précipitations maximales sur cinq jours de GHCNDEX[3]. GHCNDEX fournit des indices des valeurs extrêmes de températures et de précipitations sous forme de grilles, par station.

La fonction de distribution des probabilités (FDP) des précipitations n'est pas normale; elle est plutôt asymétrique vers la droite, parce que la queue gauche de la distribution doit toujours être ancrée à zéro. Les précipitations maximales sur cinq jours au cours du mois (exprimées en unités de précipitations en millimètres) ont été choisies pour représenter les variations dans la queue droite (valeurs élevées) de la FDP des précipitations. Une composante complémentaire de l'IAC qui insiste sur la sécheresse météorologique est appliquée à la partie gauche de la FDP.

Les calculs pour cette composante sont presque les mêmes que ceux de la composante du niveau de la mer. Les précipitations maximales sur cinq jours consécutifs forment la base des données, exprimées en la forme $MaxP^{(5\text{-}day)}$.

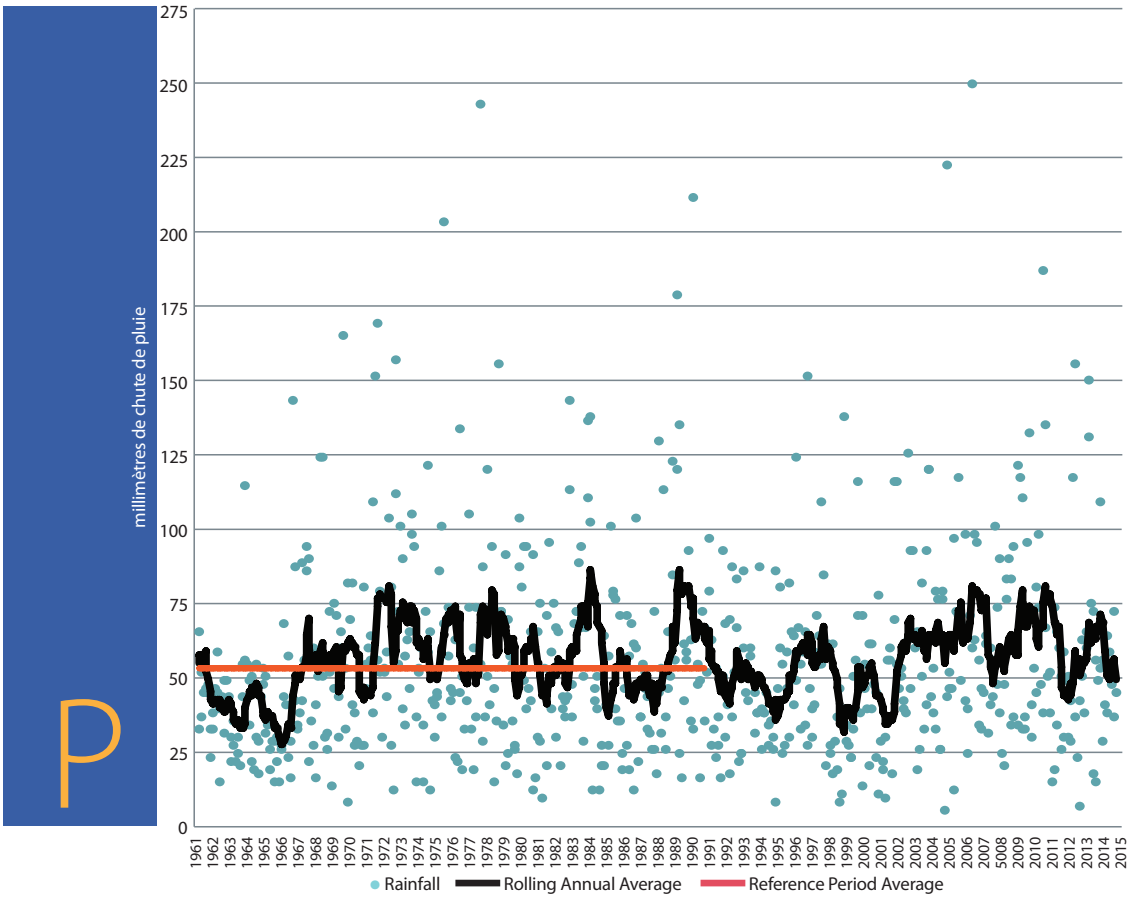
La station choisie pour illustrer l'anomalie $MaxP^{(5\text{-}day)}$ est celle de la tour de Central Park, à New York.

Puisque les précipitations sont mesurées d'après les valeurs maximales, la distribution est plus asymétrique que le niveau de la mer. Certains mois représentent des valeurs aberrantes extrêmes, qui dépassent largement la moyenne des précipitations maximales sur cinq jours.

3 National Center for Atmospheric Research/University Corporation for Atmospheric Research, Climate Data Guide, consulté le 11 novembre 2016.

Figure 3.1. Précipitations maximales sur cinq jours

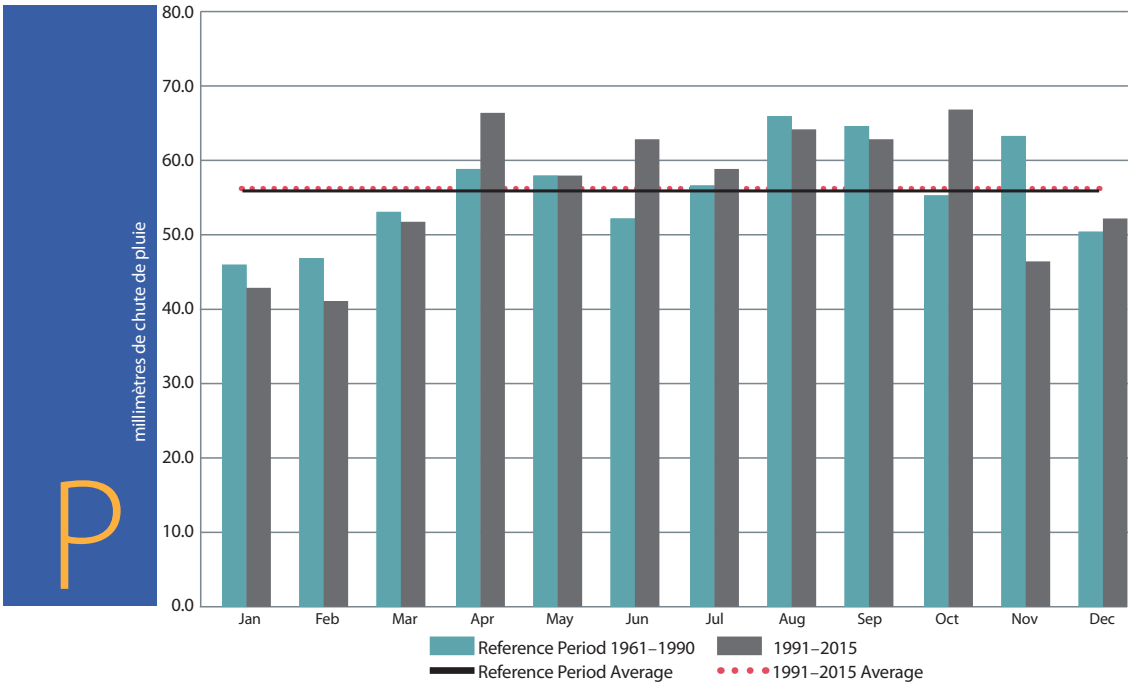
Central Park, New York



Ces données mensuelles sont converties en une moyenne des précipitations maximales sur cinq jours au cours de la période de référence de 30 jours, créant ainsi un ensemble de 12 moyennes. Les écartstypes sont calculés pour chaque mois au cours de la même période de référence afin d'étalonner et de standardiser la distribution. Les moyennes de la période de référence sont présentées dans la figure ciaprès, tout comme les moyennes mensuelles des années subséquentes. Nous n'observons aucun déplacement des moyennes globales entre les périodes à cet endroit, même si la moyenne des précipitations maximales sur cinq jours selon le mois est assujettie à des variations aléatoires.

Figure 3.2. Moyenne MaxP$^{(5\text{-day})}$ *(j,k)* selon le mois

Central Park, New York



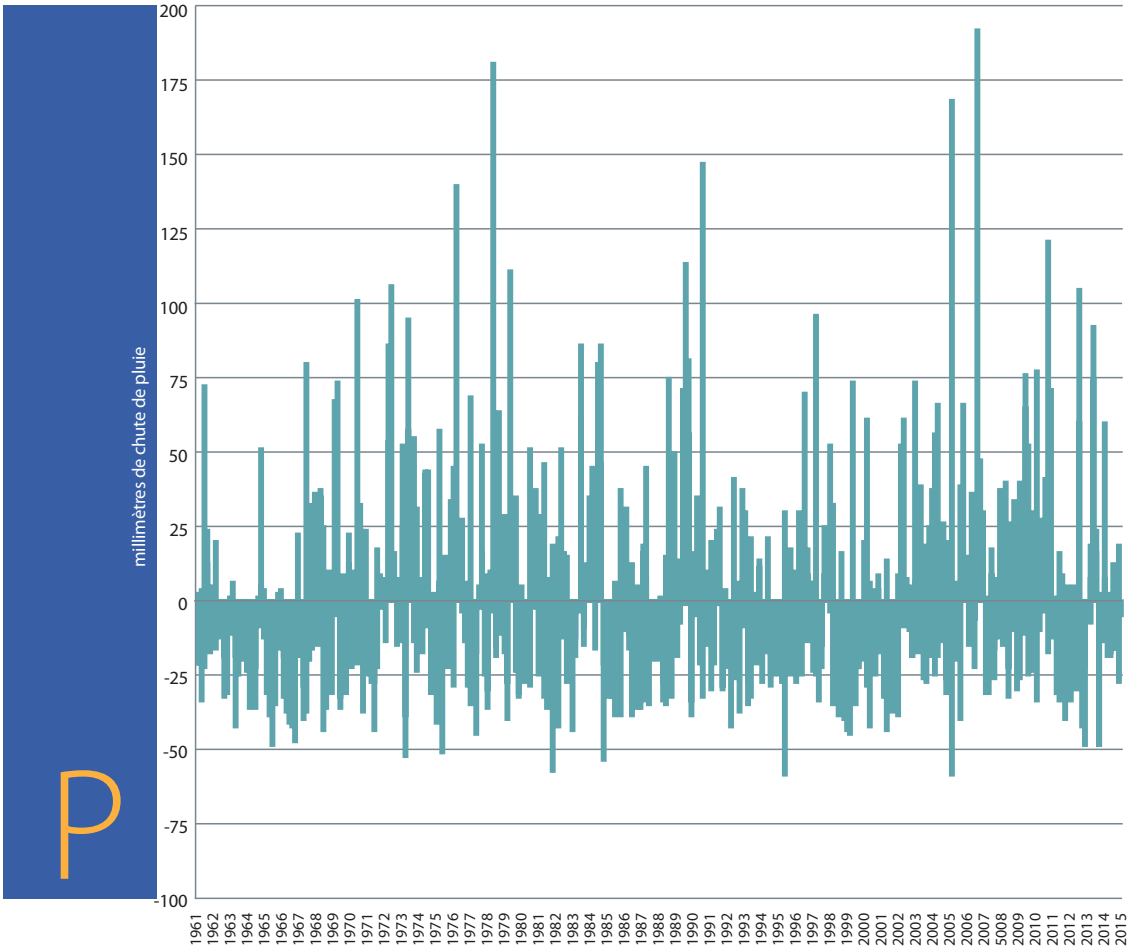
Mois(j):	Janv.	Févr.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juill.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
$\mu_{ref} MaxP^{(5\text{-day})}(j)$	45,9	46,9	53,1	58,8	57,9	52,4	56,7	66,3	64,8	55,2	63,5	50,4
$\sigma_{ref} MaxP^{(5\text{-day})}(j)$	30,0	20,7	24,6	27,8	31,8	32,7	31,0	47,3	50,0	27,3	46,6	19,4

Pour l'IAC, les valeurs de chaque mois et de chaque année au cours de la période à l'étude sont utilisées. Par conséquent, pour chaque mois au cours de la période d'observation, les anomalies sont établies en comparant les valeurs mensuelles courantes et les valeurs de la période de référence. L'anomalie de $MaxP^{(5\text{-day})}$ par rapport à la valeur de la période de référence au cours d'un mois est exprimée ainsi :

$$\Delta MaxP^{(5\text{-day})}(j,k) \quad = \quad MaxP^{(5\text{-day})}(j,k) - \mu_{ref} MaxP^{(5\text{-day})}(j)$$

Figure 3.3. $\Delta MaxP^{(5\text{-}day)}(j,k)$

Central Park, New York



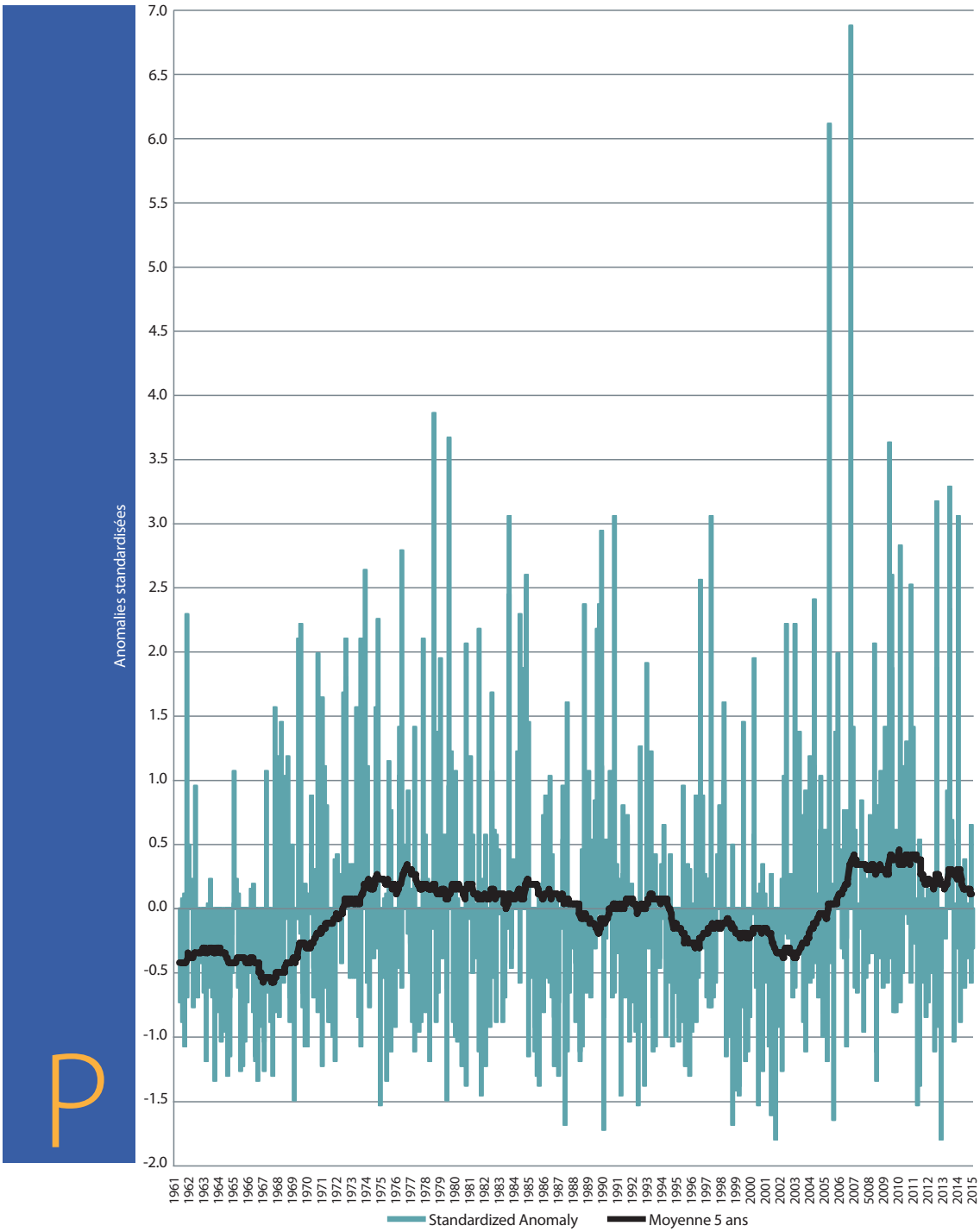
Pour combiner les six composantes de l'IAC, les écarts $\Delta MaxP^{(5\text{-}day)}$ ont été convertis encore une fois en ratios par rapport aux écartstypes à l'aide de la formule suivante :

$$MaxP^{(5\text{-}day)}_{std}(j,k) = [MaxP^{(5\text{-}day)}(j,k) - \mu_{ref}\, MaxP^{(5\text{-}day)}(j)\,] / \sigma_{ref}\, MaxP^{(5\text{-}day)}(j)$$

$$= \Delta MaxP^{(5\text{-}day)}(j,k) / \sigma_{ref} MaxP^{(5\text{-}day)}(j)$$

Figure 3.4. $MaxP^{(5\text{-}day)}_{std}$

Central Park, New York



4. Températures élevées

L'une des mesures les plus importantes de l'indice a trait aux températures élevées, car elles représentent un indicateur fondamental des risques climatiques. Les « températures élevées » sont établies par seuils de jours civils, représentant la tranche de 10 % des températures les plus élevées calculées pendant cinq jours civils rapprochés au cours de la période de référence. Vu que les températures varient selon les saisons et au quotidien pendant toute l'année, les seuils sont lissés en sélectionnant cinq jours civils centrés sur le calcul de chaque jour civil, sur 30 ans, pour une base de 150 valeurs.

La définition de l'expression « températures élevées » est comparative, et non absolue, et elle vise non seulement les mois d'été, mais toute l'année. Une température élevée en été peut désigner une chaleur extrême, ce qui peut entraîner une morbidité et une mortalité excessives. Des températures élevées au printemps, à l'automne et en hiver peuvent sousentendre une variation climatique qui influence l'écologie de la faune et de la flore, l'agriculture, les conditions météorologiques et les tempêtes. La composante tient compte des températures maximales et minimales élevées, les températures maximales correspondant habituellement aux températures élevées de jour et les températures minimales s'apparentant aux températures élevées de nuit. Parfois, les températures les plus élevées sont enregistrées la nuit et les températures les plus basses sont constatées de jour, en raison de la variation de la couche nuageuse et du déplacement des fronts. C'est la raison pour laquelle ces mesures sont désignées maximum et minimum « quotidien » plutôt que maximum et minimum « de jour » et « de nuit ».

Cet exemple indique le mode de calcul de la composante des températures élevées de l'IAC pour une station météorologique à Toronto, en Ontario4. Veuillez noter que les données du GHCNDEX[5] contiennent déjà la fréquence des températures se situant au-dessus de la tranche de 10 % des températures les plus élevées pour chaque cellule de la grille. Afin d'éviter une inhomogénéité possible à l'échelle des périodes de référence et à l'extérieur de la période de référence, le calcul GHCNDEX pour la période de référence (1961 à 1990) exige l'utilisation d'un processus de bootstrapping. Les détails sont décrits dans Zhang et al. (2005)[6]. Une simulation Monte Carlo démontre que les seuils de température calculés au cours de la période de base dépendent de l'erreur d'échantillonnage, qui est corrigée par la méthode de rééchantillonnage bootstrap. Cet exemple donne un aperçu du calcul éventuel à l'aide du programme GHCNDEX, mais sans la technique bootstrap.

4 Les données quotidiennes pour le Toronto City Centre ont été obtenues auprès du site des données historiques de Statistique Canada.

5 Donat, M.G., L.V. Alexander, H. Yang, I. Durre, R. Vose, J. Caesar, « Global Land-Based Datasets for Monitoring Climatic Extremes », *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 94, 2013, p. 997–1006.

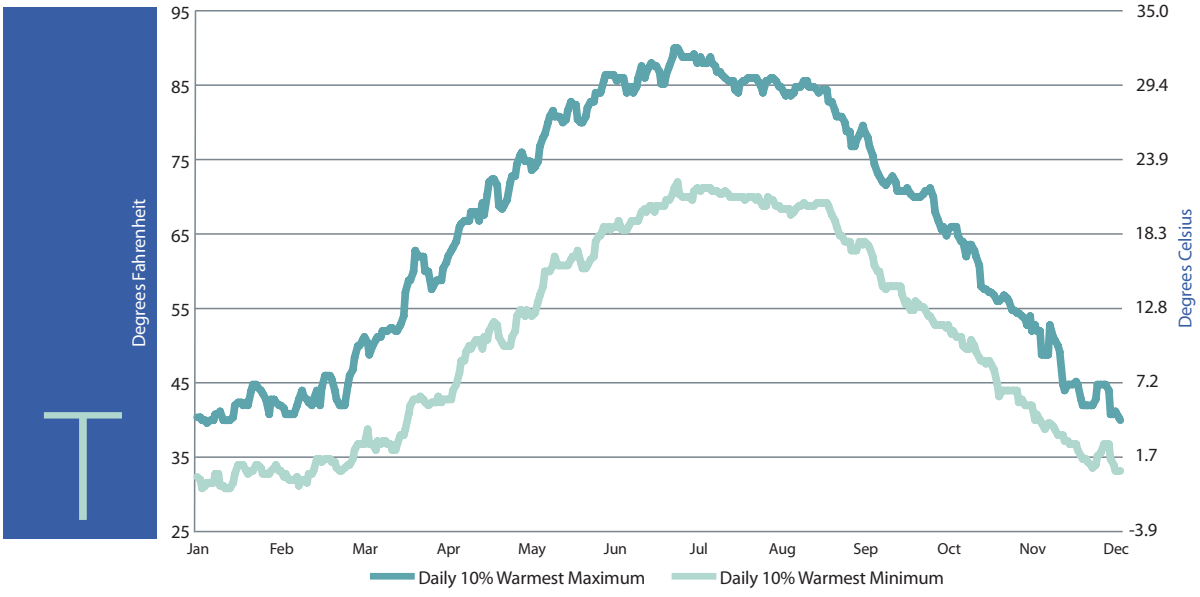
6 Zhang, X., et al. (2005). « Avoiding Inhomogeneity in Percentile-Based Indices of Temperature Extremes », *J. Climate*, vol. 18, p. 1641-1651.

La figure 4.1 indique les seuils de jours civils établis d'après la tranche de 10 % des températures les plus élevées au cours de la période de référence. Ces seuils ont été rajustés à partir du calcul initial pour corriger les erreurs d'échantillonnage; ainsi, la fréquence de dépassement au cours de la période de référence est de 10 %. Il en découle des erreurs d'échantillonnage parce que les 30 valeurs utilisées pour déterminer la fréquence de dépassement pour chaque année civile au cours de la période de référence est un sous ensemble des 150 valeurs utilisées pour déterminer le seuil de température; par conséquent, la fréquence de dépassement se rapproche de 10 % sans nécessairement l'atteindre. L'axe de gauche indique les degrés Fahrenheit (°F), tandis que l'axe de droite présente les degrés Celsius (°C). L'axe de gauche montre les degrés Fahrenheit (°F), tandis que l'axe de droite affiche les degrés Celsius (°C). La courbe de la tranche de 10 % des températures les plus élevées pour les maximums quotidiens est exprimée en noir et celle des températures les plus élevées pour les minimums quotidiens est représentée en gris.

Aux fins d'illustration, la valeur seuil la plus élevée pour les températures maximales quotidiennes est enregistrée le 9 juillet, lorsque la tranche de 10 % de la température maximale est 90,0 °F (32,2 °C). Cela signifie que le 9 juillet à Toronto, on s'attendrait que la température maximale dépasse 90,0 ° F (32,2 °C) seulement une année sur dix. Le sommet pour la tranche de 10 % des températures minimales les plus élevées est observé le même jour (9 juillet), soit 72,0 °F (22,2 °C). Cela signifie que le 9 juillet, on s'attendrait que la température minimale dépasse 72,0 °F (22,2 °C) une année sur dix. Si un jour est choisi en mars – par exemple, le 15 mars – la tranche de 10 % des températures maximales les plus élevées correspond à 52,2 ° F (11,2 °C), tandis que la tranche de 10 % des températures minimales les plus élevées est 37,4 °F (3,0 °C).

Figure 4.1. Seuils de 10 % des températures les plus élevées

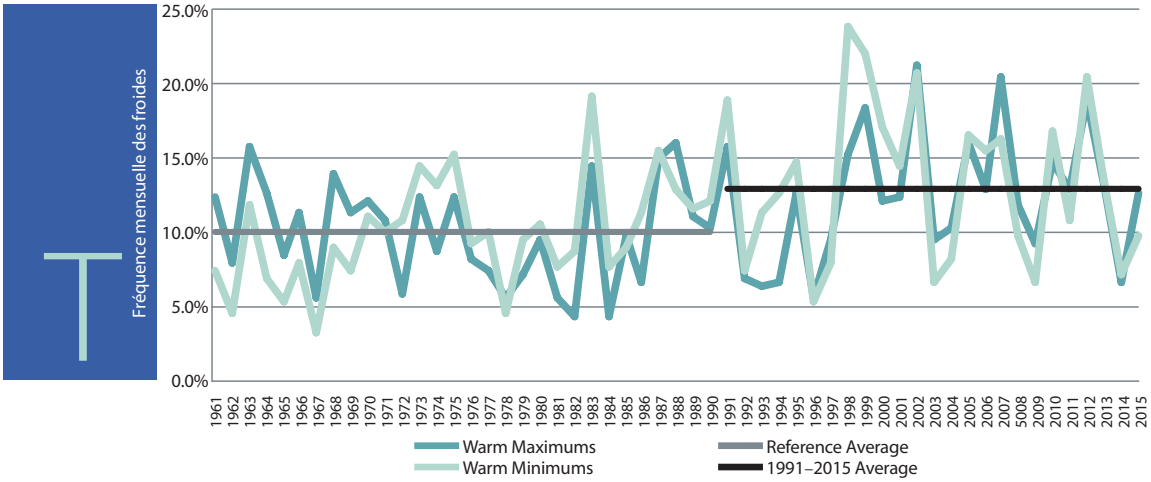
Toronto, Canada



À l'aide des seuils établis sur une moyenne mobile de cinq jours civils au cours de la période de référence, nous calculons la fréquence à laquelle les températures dépassent ces valeurs. Les températures maximales et minimales quotidiennes ont tendance à dépasser ces seuils à l'unisson, comme le montre la figure 4.2 :

Figure 4.2. Fréquence annuelle des températures chaudes

Toronto, Canada

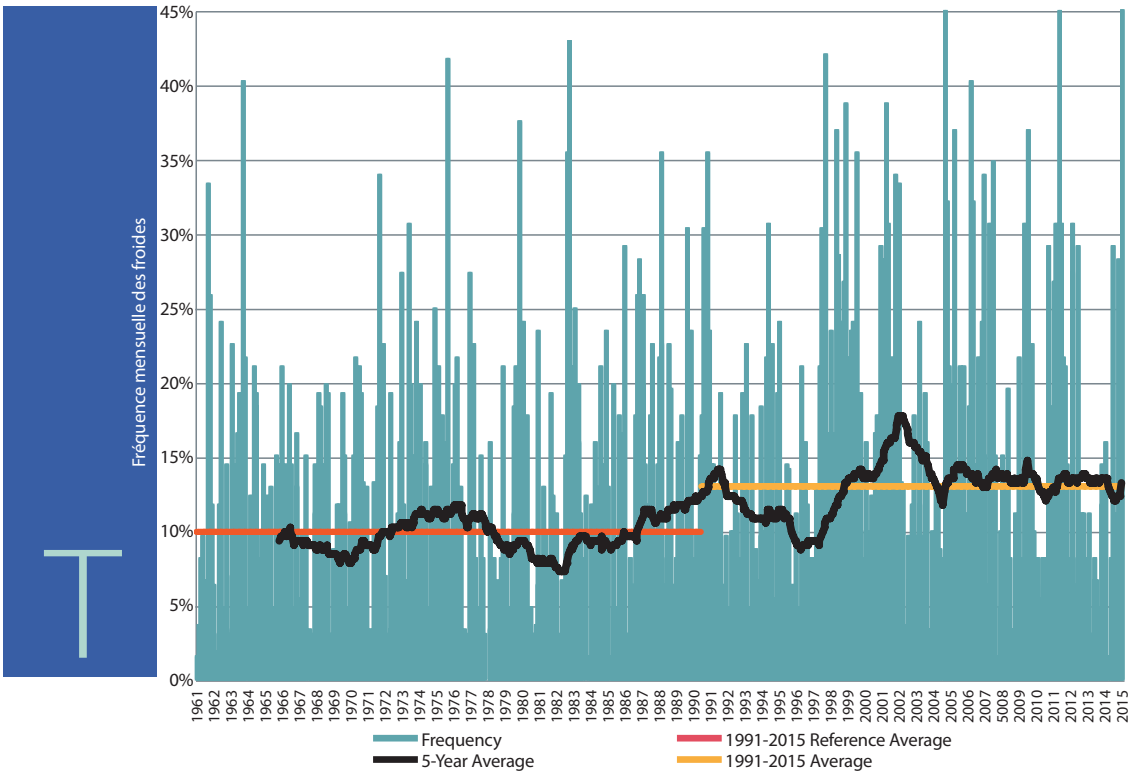


La ligne à trait fin indique la moyenne des fréquences des températures élevées au cours de la période de référence qui, par définition, représente une tranche de 10 %, comparativement à la période de 25 ans qui a suivi la période de référence, où l'on a enregistré une moyenne de 13,0 %. La ligne noire représente la fréquence des températures quotidiennes maximales élevées, tandis que la ligne grise correspond à la fréquence des températures quotidiennes minimales élevées. Pour garantir la clarté de la présentation, les fréquences mensuelles ont été exprimées en moyennes dans les données sur la fréquence annuelle.

Dans l'IAC, afin d'éviter le double compte, nous avons établi des moyennes de fréquence des extrêmes de températures élevées maximales et minimales, car ces deux fréquences sont fortement corrélées. La figure ciaprès indique la fréquence des extrêmes de températures minimales quotidiennes élevées auxquels nous avons ajouté les extrêmes de températures maximales quotidiennes élevées, que nous avons ensuite divisés par deux. La figure 4.3 s'étend sur 55 ans au total, c'estàdire la période de référence de 30 ans suivie des 25 années subséquentes.

Figure 4.3. Fréquence mensuelle des températures chaudes

Toronto, Canada



Comme on peut le constater dans la figure cidessus, les fréquences des températures sont très variables. L'une des façons d'établir une distinction entre le signal et le bruit dans les observations consiste à utiliser une technique d'étalement, notamment la moyenne de cinq ans indiquée cidessus.

Les anomalies standardisées sont ensuite calculées de la manière suivante :

$$F\,T{:}warm\,(j,k) = [\,F\,T{:}warm_{max}\,(j,k) + F\,T{:}warm_{min}(j,k)\,]\,/\,2$$

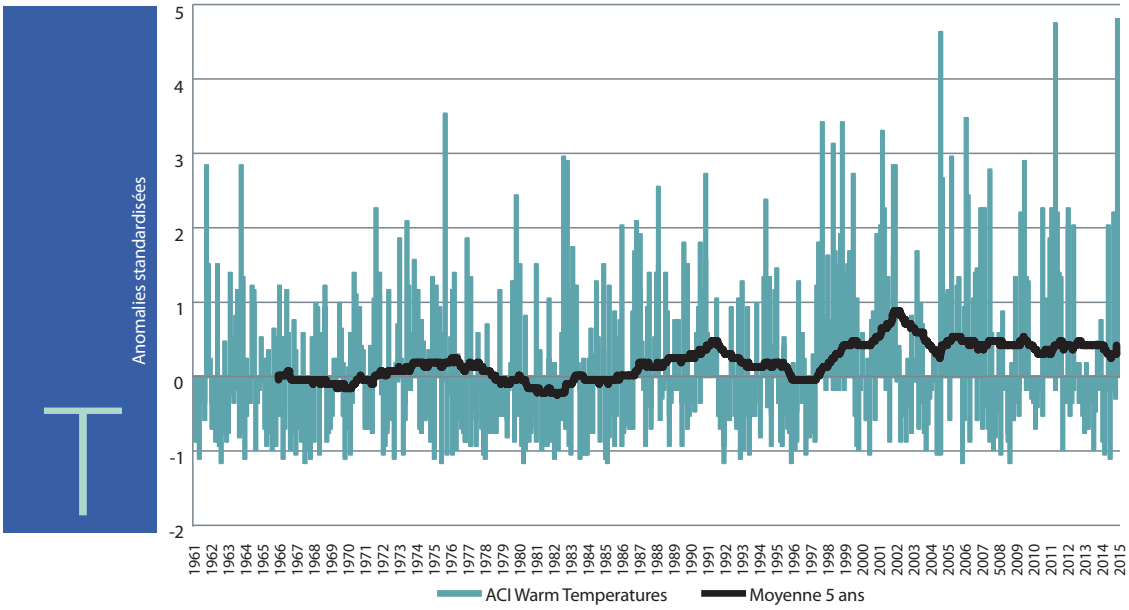
$$\sigma_{ref}\,F\,T{:}warm\,(j) = \sigma_{ref}[\,F\,T{:}warm_{max}\,(j) + \sigma_{ref}F\,T{:}warm_{min}\,(j)\,]\,/\,2$$

$$F\,T{:}warm_{std}\,(j,k) = \frac{[\,F\,T{:}warm\,(j,k) - \mu_{ref}\,F\,T{:}warm\,(j)\,]}{\sigma_{ref}\,F\,T{:}warm\,(j)}$$

où F T:warm$_{max}$(j,k) représente la fréquence mensuelle des températures maximales élevées quotidiennes, et F T:warm^{min}(j,k) la fréquence mensuelle des températures minimales élevées quotidiennes. Les fréquences moyennes mensuelles pour tous les mois au cours de la période de référence, μ_{ref}F T:warm (j), est de 10 %, pour j = Janv., Févr., …Déc.

Figure 4.4 Anomalies standardisées—Températures chaudes

Toronto, Canada

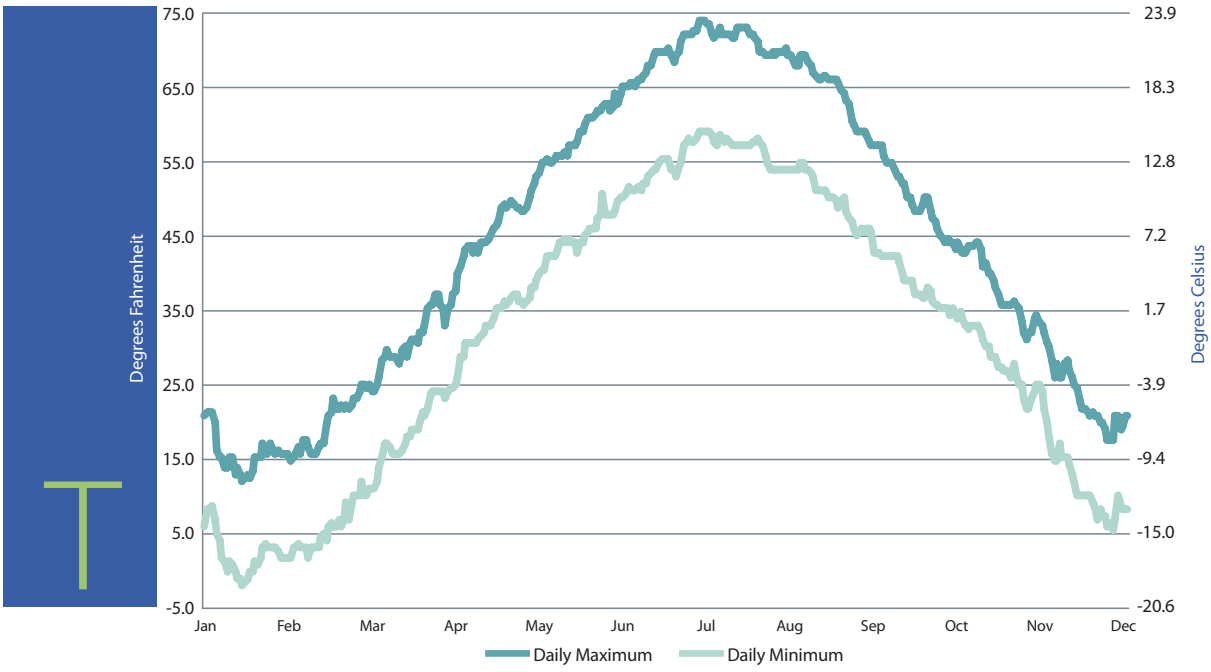


5. Températures basses

La prochaine mesure utilisée dans l'indice est la fréquence des températures basses, étant donné qu'une diminution de ces températures indique que la répartition des températures s'est déplacée vers la droite. Puisqu'une diminution des extrêmes de températures basses constitue un indice de réchauffement climatique, la composante *F T:cool(j, k)* est soustraite de l'IAC. La méthodologie est la même que celle des températures élevées, les seuils de températures basses étant établis de façon semblable en déplaçant cinq jours civils à l'intérieur de la période de référence. Par définition, les « températures basses » représentent la tranche de 10 % des températures quotidiennes les plus basses mesurées pour un jour civil particulier sur toute la période de référence. La définition des températures basses est comparative, et non absolue, de sorte qu'une température basse peut être relevée non seulement en hiver, mais pendant toute l'année. L'absence de températures basses peut constituer un signe de changement climatique qui influe sur l'écologie de la faune et de la flore, l'agriculture, les conditions météorologiques et les tempêtes. Par exemple, l'absence de températures basses peut influencer la production fruitière, car les arbres fruitiers ont besoin d'un certain niveau de températures froides à l'hiver pour favoriser la croissance des fruits. La production de sirop d'érable exige un bon équilibre entre le gel de nuit et les températures audelà du point de congélation le jour pour que la sève circule.

Figure 5.1. Seuils de 10 % des températures les plus basses

Toronto, Canada

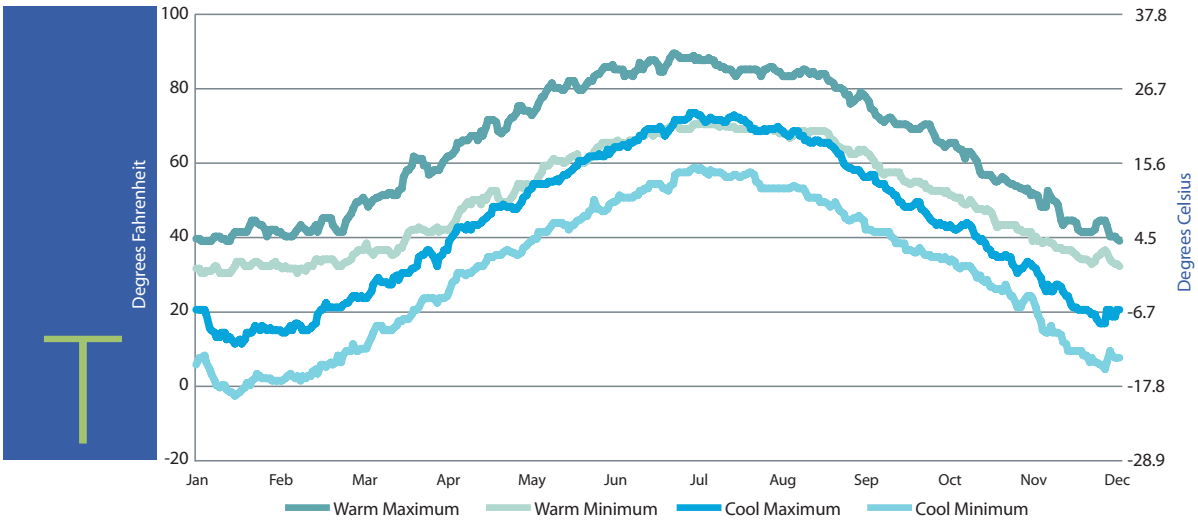


La figure 5.1 indique les courbes de seuil de la tranche de 10 % des températures les plus basses à Toronto, la courbe supérieure représentant la tranche de 10 % des seuils de températures maximales quotidiennes les plus basses, et la courbe inférieure indiquant la tranche de 10 % des seuils de températures minimales quotidiennes les plus basses. La moyenne du jour civil le plus froid de l'année à Toronto se situe aux alentours du 16 janvier, les températures minimales atteignant -1,9 °F (-18,8 °C) 10 % du temps. La moyenne de la température maximale la plus froide se situe le même jour civil (16 janvier), la température maximale la plus froide étant de 12,1 °F (-11,1 °C) 10 % du temps. Le point le plus élevé dans cette figure est le 17 juillet, le jour civil où la température maximale la plus basse attendue est inférieure à 74,1 °F (23,4 °C) 10 % du temps. Une autre façon d'envisager cette question consiste à déterminer que 90 % du temps, nous attendons la température maximale la plus basse d'au moins 74,1 °F (23,4 °C) le 17 juillet et que, 90 % du temps, nous nous attendons à ce que la température minimale ne soit pas plus basse que 59,2 °F (15,1 °C).

La figure qui suit montre une comparaison de la tranche de températures de 10 % les plus élevées et de la tranche de températures de 10 % les plus basses pour Toronto.

Figure 5.2. Seuils de 10 % des températures les plus chaudes et les plus froides

Toronto, Canada

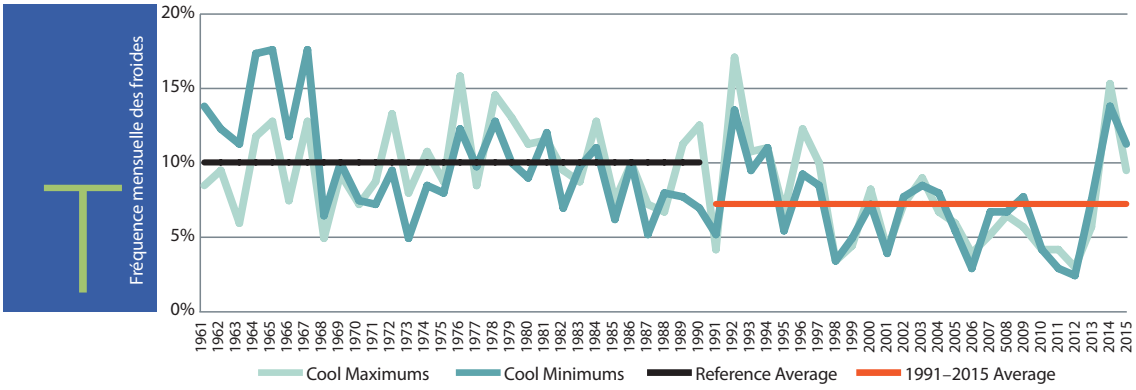


Il semble exister un chevauchement plus important des températures maximales et minimales au cours de l'été. D'octobre à avril, les températures minimales les plus élevées sont supérieures aux températures maximales les plus basses.

Les tranches de 10 % des températures maximales et minimales quotidiennes ont tendance à se déplacer ensemble, comme le montre la figure 5.3.

Figure 5.3. Fréquence annuelle des températures froides

Toronto, Canada

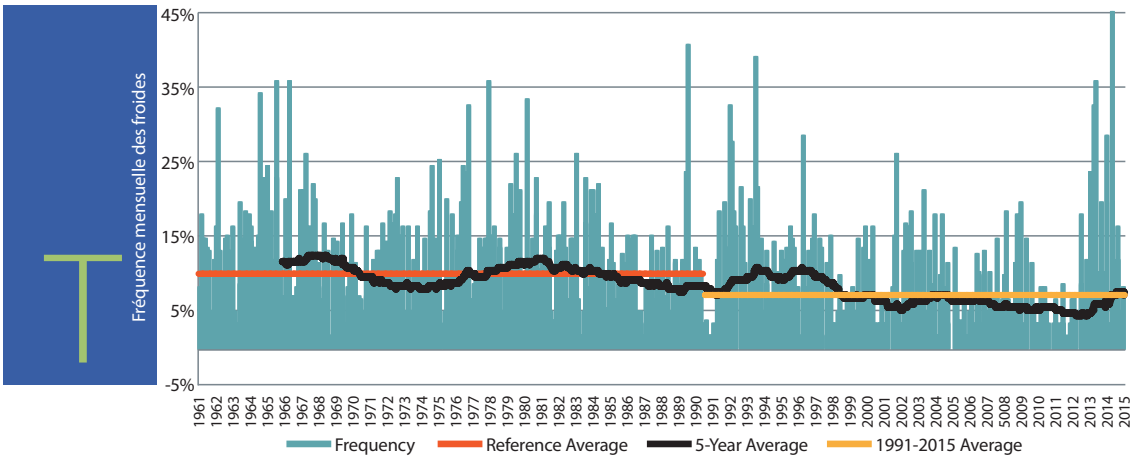


La ligne noire indique les fréquences moyennes des températures basses au cours de la période de référence, ce qui, par définition, correspond à 10 %, par rapport à la période de 25 ans suivant la période de référence, au cours de laquelle on a enregistré une moyenne de 7,2 %. Ce résultat indique qu'à Toronto, les températures plus basses ont été moins fréquentes après la période de référence. La ligne bleu pâle représente la fréquence des températures maximales quotidiennes basses, tandis que la ligne bleu foncé représente la fréquence des températures minimales quotidiennes basses.

À l'instar des calculs des températures élevées, nous avons établi une moyenne des fréquences des extrêmes de températures maximales et minimales quotidiennes basses, car les deux températures sont fortement corrélées. La figure 5.4 cidessous indique la fréquence des extrêmes de températures minimales quotidiennes basses auxquels nous avons ajouté les extrêmes de températures maximales quotidiennes basses, que nous avons ensuite divisé par deux. La figure ciaprès s'étend sur 55 ans au total, c'estàdire la période de référence de 30 ans suivie des 25 années subséquentes.

Figure 5.4. Fréquence mensuelle des températures froides

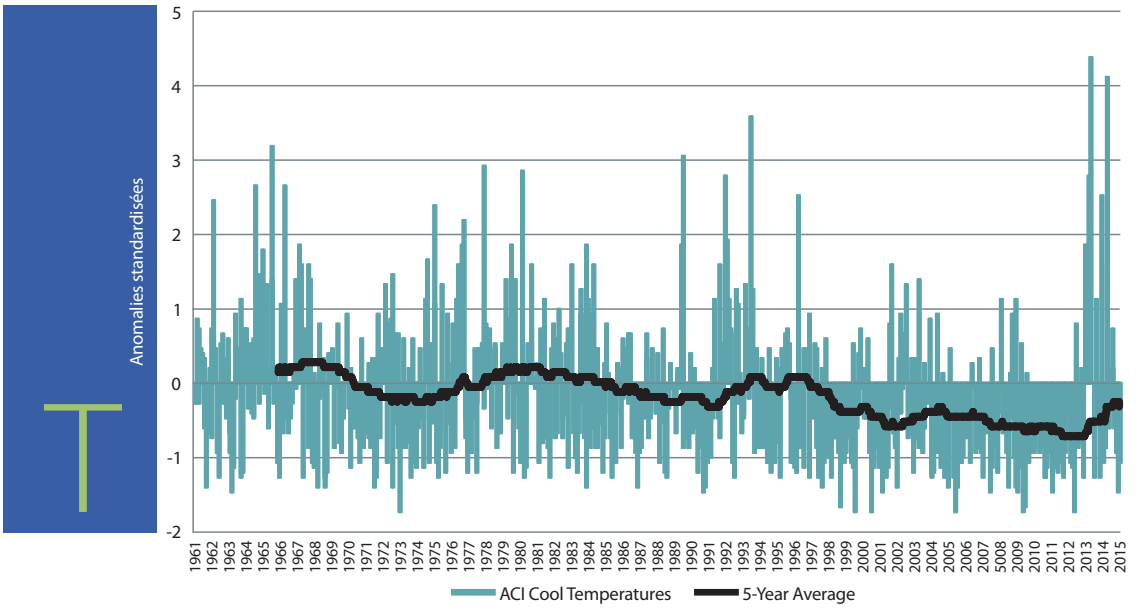
Toronto, Canada



Tout comme pour les autres composantes, les anomalies standardisées sont calculées et affichées dans la figure 5.5 cidessous :

Figure 5.5. Anomalies standardisées—Températures froides

Toronto, Canada



Au cours des 15 années précédentes, la moyenne sur cinq ans à Toronto affiche un moins grand nombre d'extrêmes de températures basses, et un léger mouvement à la hausse des températures basses ces dernières années.

6. Puissance éolienne

À l'exemple des précipitations, la FDP de la vitesse moyenne quotidienne des vents est asymétrique vers la droite, et les variations les plus intéressantes sont celles situées dans la queue de la distribution, là où les valeurs sont élevées. Les mesures de la vitesse moyenne quotidienne des vents[7] sont converties en puissance éolienne (WP) à l'aide de la relation $WP = (1/2)\,\rho w^3$, où w représente la vitesse moyenne quotidienne des vents et ρ est la densité de l'air (présumée constante à 1,23 kg/m3). La puissance éolienne est utilisée parce que les dommages causés par des vents forts s'avèrent proportionnels à WP, plutôt qu'à w (voir le Rapport de la phase I[8], sect. 5.6). Les seuils de la puissance éolienne sont déterminés pour chaque jour et mois dans la période de référence, $WP_{ref}(i,j)$, pour chaque jour *i* et mois *j* (*j* = Janv., Févr., … Déc.), à chaque point de la grille séparément. La valeur $WP_{ref}(i,j)$ est déterminée comme étant la moyenne plus un écart-type de 1,28 de $WP(i,j,k)$ pour les 30 valeurs de l'années k dans la période de référence. Le nombre de jours où la vitesse moyenne des vents dépasse $WP_{ref}(i,j)$ est ensuite indiqué en pourcentage du nombre de jours du mois en y ajoutant une mesure de la fréquence de dépassement pour chaque mois de chaque année de la période entière. Il convient de noter que des écarts type de 1,28 au dessus de la moyenne ont été choisis pour isoler la tranche supérieure de 10 % de la vitesse des vents (et, de façon équivalente, la puissance éolienne). En raison de l'erreur d'échantillonnage, la fréquence de la vitesse extrême des vents au cours de la période de référence est de 13 %. Nous prévoyons de modifier le calcul du seuil de vitesse des vents au cours de la période de référence dans une prochaine version de l'IAC, de sorte que la fréquence de dépassement du seuil au cours de la période de référence se situe à 10 %, ce qui correspond à d'autres composantes de l'IAC qui utilisent des fréquences de dépassement. La méthode en vigueur produit quand même des renseignements utiles, car elle mesure les fréquences de dépassement au cours de la période actuelle, plutôt que durant la période de référence, et elle les uniformise en les divisant par l'écart type des fréquences de dépassement au cours de la période de référence. Par exemple :

$$F\,WP_{std}(j,k) \quad = \quad [\,F\,WP(j,k) - \mu_{ref}(j)\,] \,/\, \sigma_{ref}(j)$$

7 National Centers for Environmental Information, « Measurements », consulté le 15 novembre 2016.
8 Solterra Solutions. Déterminer les répercussions du changement climatique sur le risque d'assurance et la communauté mondiale, Phase I : Principaux indicateurs, novembre 2012.

Il convient de noter que le facteur de dommage n'est pas intégré au calcul de l'IAC. Le seuil pour la puissance éolienne se situera au même point que la vitesse des vents, de sorte que ces fréquences sont identiques pour la vitesse des vents et la puissance éolienne. Les fréquences sont standardisées en soustrayant la moyenne et en les divisant par l'écarttype de la période de référence. À l'aide d'une formule Excel qui représente une valeur de 1 lorsque l'inégalité entre parenthèses est vraie, le calcul de la fréquence initiale équivaut à la somme de :

$$F\,WP\,(j,k) \quad = \quad [\sum_{i=1}^{n(j)} ((\,WP(i,j,k) - WP_{ref}(j)) > 0\,) * 1]\;/\;n(j)$$

où i représente le jour, j le mois, k l'année et n(j) le nombre de jours dans le mois j.

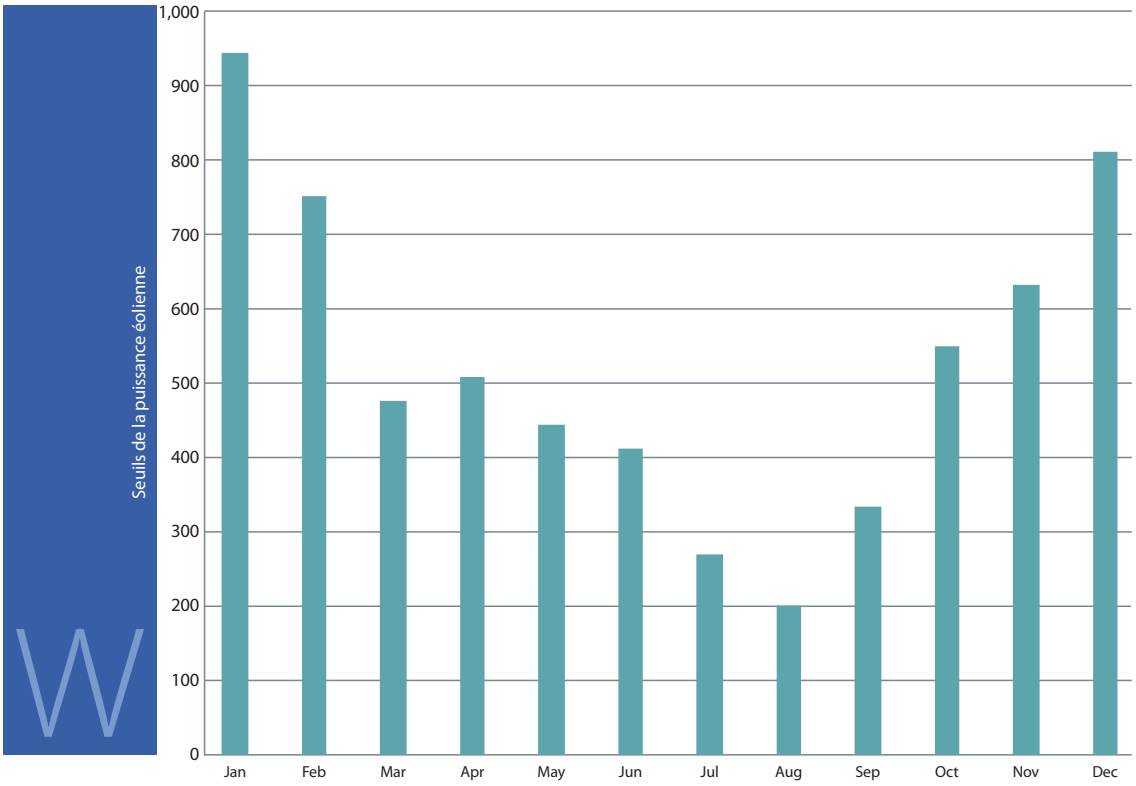
$$F\,WP_{std}\,(j,k) \quad = \quad [\,F\,WP\,(j,k) - \mu_{ref}(j)\,]\,/\,\sigma_{ref}(j)$$

L'exemple de calcul portera sur la grille renfermant la station de Lethbridge, en Alberta. La région visée par cette grille s'étend des latitudes 47,5 et 50 degrés nord et des longitudes 110 à 112,5 degrés ouest. Dans la région de la grille de Lethbridge, la moyenne quotidienne de la vitesse des vents entre 1961 et 2011 oscille entre 0 et 24,4 mètres par seconde, de sorte que les valeurs de la puissance éolienne se situent entre 0 et 8 919,2. La moyenne de la vitesse moyenne quotidienne des vents par mois au cours de la période de référence de 30 ans se compose d'une étroite fourchette qui s'étend d'un seuil de 4,25 *mps* en août à un plafond de 6,02 *mps* en janvier. Le seuil pour la puissance éolienne selon le mois s'étend sur une large fourchette, de $WP_{ref}(Aug)$ = 202,0 mps à $WP_{ref}(Jan)$ = 945,5 mps.

Les seuils de la puissance éolienne pour la période de référence sont présentés à la figure 6.1.

Figure 6.1. Seuils de la puissance éolienne $WP_{ref}(j)$

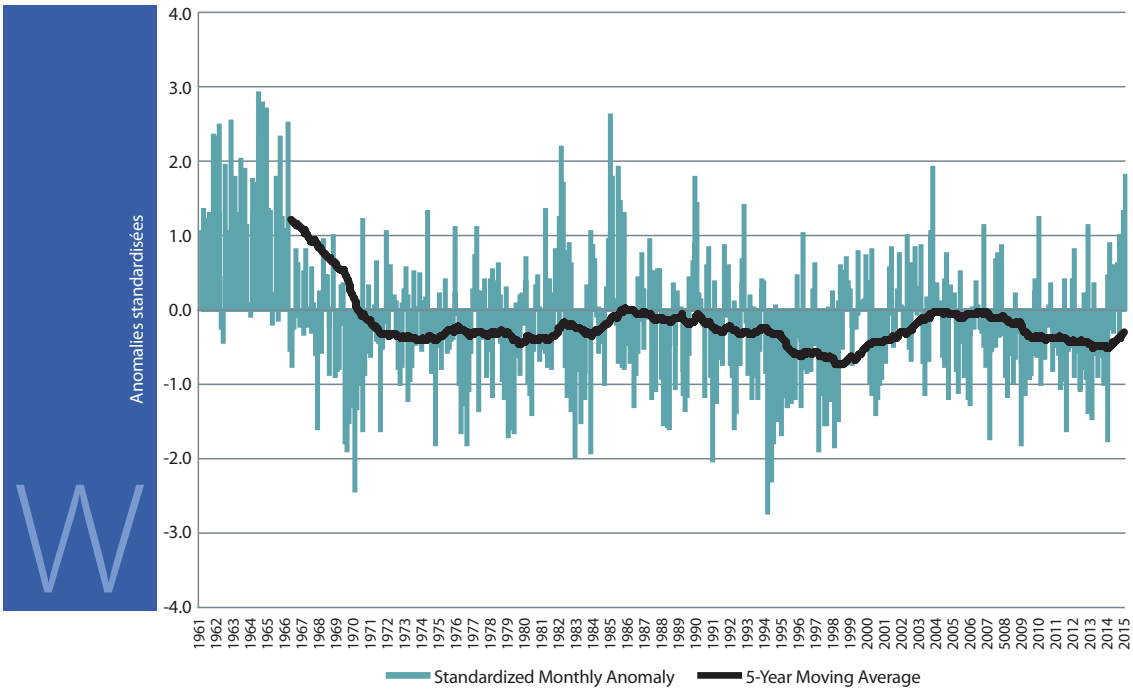
Lethbridge, Alberta, Canada



	Janv.	Févr.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juill.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
$WP_{ref}(j)$	945,5	750,8	477,3	508,8	445,6	410,5	269,3	202,0	332,7	547,4	632,5	810,1
Seuil de la vitesse des vents m/s :	11,5	10,7	9,2	9,4	9,0	8,7	7,6	6,9	8,1	9,6	10,1	11,0
Seuil de la vitesse des vents kph :	41,4	38,5	33,1	33,8	32,4	31,3	27,4	24,8	29,2	34,6	36,4	39,6
Seuil de la vitesse des vents mph :	25,7	23,9	20,6	21,0	20,1	19,5	17,0	15,4	18,1	21,5	22,6	24,6

Les séries temporelles de $F\ WP_{std}$ sont affichées à la figure 6.2.

Figure 6.2. ΔWP_{std}
Lethbridge, Alberta, Canada



Il convient de noter que la vitesse des vents semble beaucoup plus élevée au début de la période de référence à cet endroit particulier. Il est possible que cette augmentation soit reliée à l'amélioration des mesures anémométriques au milieu des années 1960 à cet endroit particulier. Cette anomalie ne semble pas poser problème pour l'ensemble des données sur le vent.

L'Indice actuariel climatique

La moyenne des anomalies standardisées est établie lorsqu'elles sont jumelées à l'IAC. Il convient de noter que la composante des températures basses, $F\,T{:}cool_{std}\,(j,k)$, est soustraite de l'indice, car elle compte un moins grand nombre d'extrêmes de températures basses comme preuve du déplacement de la courbe de distribution de probabilité des températures vers la droite.

$$IAC\,(j,k) = \frac{MaxCDD_{std}\,(j,k) + S_{std}\,(j,k) + Max\,P^{(5\text{-}day)}{}_{std}\,(j,k) + F\,T{:}warm_{std}\,(j,k) - F\,T{:}cool_{std}\,(j,k) + F\,WP_{std}\,(j,k)}{6^{\dagger}}$$

† Il convient de noter que la région de l'Arctique central (CAR) ne comporte pas de composante de niveau de la mer en raison du manque de données complètes pour le niveau de la mer, et que le Midwest ne comporte pas de données pour le niveau de la mer étant donné que cette région n'est pas située le long d'un littoral océanique. Pour ces régions, la composante du niveau de la mer est omise de l'IAC, et un diviseur de 5 est utilisé pour établir la moyenne des cinq autres composantes.

ACTUARIES CLIMATE INDEX
INDICE ACTUARIEL CLIMATIQUE

ACTUARIESCLIMATEINDEX.ORG

© 2018 American Academy of Actuaries, Institut canadien des actuaires, Casualty Actuarial Society et Society of Actuaries. Tous droits réservés.