

L'automatisation des réseaux d'observation météorologique et ses répercussions sur la surveillance à long terme du climat

Édition 2017

TEMPS CLIMAT EAU



ORGANISATION
MÉTÉOROLOGIQUE
MONDIALE

OMM-N° 1202

L'automatisation des réseaux d'observation météorologique et ses répercussions sur la surveillance à long terme du climat

Édition 2017



ORGANISATION
MÉTÉOROLOGIQUE
MONDIALE

OMM-N° 1202

NOTE DE L'ÉDITEUR

La base de données terminologique de l'OMM, METEOTERM, peut être consultée à l'adresse <http://public.wmo.int/fr/ressources/meteoterm>.

Il convient d'informer le lecteur que lorsqu'il copie un hyperlien en le sélectionnant dans le texte, des espaces peuvent apparaître après [http://](#), [https://](#), [ftp://](#), [mailto:](#), et après les barres obliques (/), les tirets (-), les points (.) et les séquences de caractères (lettres et chiffres). Il faut supprimer ces espaces de l'URL ainsi recopiée. L'URL correcte apparaît lorsque l'on place le curseur sur le lien. On peut aussi cliquer sur le lien et copier l'adresse qui s'affiche dans le ruban du navigateur.

OMM-N° 1202

© **Organisation météorologique mondiale, 2017**

L'OMM se réserve le droit de publication en version imprimée ou électronique ou sous toute autre forme et dans n'importe quelle langue. De courts extraits des publications de l'OMM peuvent être reproduits sans autorisation, pour autant que la source complète soit clairement indiquée. La correspondance relative au contenu rédactionnel et les demandes de publication, reproduction ou traduction partielle ou totale de la présente publication doivent être adressées au:

Président du Comité des publications
Organisation météorologique mondiale (OMM)
7 bis, avenue de la Paix
Case postale 2300
CH-1211 Genève 2, Suisse

Tél.: +41 (0) 22 730 84 03
Fax: +41 (0) 22 730 81 17
Courriel: publications@wmo.int

ISBN 978-92-63-21202-3

NOTE

Les appellations employées dans les publications de l'OMM et la présentation des données qui y figurent n'impliquent, de la part de l'Organisation météorologique mondiale, aucune prise de position quant au statut juridique des pays, territoires, villes ou zones, ou de leurs autorités, ni quant au tracé de leurs frontières ou limites.

La mention de certaines sociétés ou de certains produits ne signifie pas que l'OMM les cautionne ou les recommande de préférence à d'autres sociétés ou produits de nature similaire dont il n'est pas fait mention ou qui ne font l'objet d'aucune publicité.

TABLE DES MATIÈRES

	<i>Page</i>
REMERCIEMENTS	vii
1. INTRODUCTION.....	1
2. ASPECTS GÉNÉRAUX OU PROPRES À DES ÉLÉMENTS PARTICULIERS DU PROCESSUS D'AUTOMATISATION DES MESURES	2
2.1 Aspects généraux.....	2
2.1.1 Exhaustivité des données	2
2.1.2 Types d'erreur spécifiques aux deux catégories de mesures	3
2.1.3 Continuité des pratiques	4
2.1.4 Entretien, étalonnage et contrôles de tolérance	5
2.1.5 Algorithmes de filtrage des pointes, d'échantillonnage dans le temps et autres	5
2.2 Éléments météorologiques	6
2.2.1 Température.....	6
2.2.2 Précipitations	9
2.2.3 Humidité atmosphérique (humidité, point de rosée et tension de vapeur)	12
2.2.4 Autres éléments	13
3. EXEMPLES DE DÉFAUTS D'HOMOGENÉITÉ AVÉRÉS IMPUTABLES À L'AUTOMATISATION DES OBSERVATIONS	14
3.1 Introduction	14
3.2 Température	14
3.3 Précipitations	15
3.4 Autres éléments	16
4. DIRECTIVES APPLICABLES À L'AUTOMATISATION	16
4.1 Mesures effectuées en parallèle pour des systèmes traditionnels et des systèmes automatiques.....	16
4.2 Essais préalables à la mise en service de stations météorologiques automatiques	17
4.3 Représentativité de la période d'observations parallèles	18
4.4 Que faire en l'absence de période d'observations parallèles exploitable?	19
4.5 Gestion des données au cours du processus d'automatisation des observations .	21
5. BIBLIOGRAPHIE	21

REMERCIEMENTS

L'OMM remercie Blair Trewin, du Bureau météorologique australien, pour sa contribution exceptionnelle à la présente publication.

1. INTRODUCTION

Note: La présente publication traite, avec exemples et recommandations à l'appui, de l'homogénéité des relevés climatologiques portant sur de longues périodes dans le contexte de l'automatisation des réseaux d'observation météorologique.

Les stations météorologiques automatiques (SMA) jouent un rôle croissant dans les réseaux d'observation météorologique, tant dans les pays développés que dans les pays en développement. Elles présentent de nombreux avantages en termes d'applications météorologiques, en permettant de recevoir en temps réel des observations à haute résolution temporelle pour un coût récurrent relativement modeste après les coûts d'installation initiaux. De nombreux sites pour lesquels on ne disposait auparavant que de quelques observations par jour sont maintenant couverts par un flux continu de données recueillies à intervalles d'une minute. Les SMA peuvent également effectuer des observations dans des zones qui n'ont pas de population humaine permanente ou difficiles d'accès pour des observateurs humains (au centre d'un aéroport par exemple). Cela étant, en comparaison des systèmes manuels, elles requièrent généralement des opérations d'entretien plus fréquentes et plus spécialisées, ce qui peut considérablement alourdir la gestion des réseaux dans certains contextes, en particulier dans les pays dont les ressources sont limitées. Elles posent également un certain nombre de défis aux programmes d'observation du climat en raison des difficultés liées à l'automatisation des mesures et de certaines spécificités des mesures automatiques, qui peuvent présenter notamment des défauts de fonctionnement d'un type particulier.

Certains pays ont achevé l'automatisation de leurs réseaux synoptiques ou annoncé que telle était leur intention (par exemple, l'Allemagne compte se doter d'un réseau entièrement automatisé d'ici à 2020; Claussnitzer *et al.*, 2015), tandis que certains pays en développement ont profité de la mise en place de SMA pour étendre notablement leurs réseaux, peu denses jusqu'alors.

Le terme «station météorologique automatique» recouvre une vaste gamme de types de station. À l'une des extrémités du spectre, il est possible de se procurer pour quelques centaines de dollars, par les circuits commerciaux classiques, des stations mesurant un éventail relativement restreint de variables avec une précision limitée mais néanmoins utile. Ces modèles sont couramment utilisés par les particuliers et les petites organisations dans de nombreux pays. À l'autre extrémité, les stations professionnelles conformes aux normes de fonctionnement établies par l'OMM peuvent coûter plusieurs dizaines de milliers de dollars; outre les variables de base que sont la température, l'humidité, la vitesse et la direction du vent, la pression atmosphérique et les précipitations, ces stations peuvent être équipées de capteurs pour mesurer, entre autres paramètres, la visibilité, la nébulosité et le type des nuages ainsi que le temps présent. Dans certains pays, les Services météorologiques et hydrologiques nationaux (SMHN) n'utilisent que les données de leurs propres SMA, tandis que dans d'autres, ces services intègrent également dans leurs produits et analyses les données issues de SMA appartenant à d'autres organisations ou à des particuliers. La présente publication exclut de la catégorie des SMA les instruments enregistreurs tels que les barographes ou les anémographes, qui enregistrent des données en continu mais nécessitent l'intervention d'un observateur pour lire des relevés sur un graphique ou autre support; sont en revanche considérés comme SMA les appareils délivrant des données sous forme numérique qui nécessitent une intervention manuelle pour diffuser les données sur le réseau de communication.

L'OMM a déjà publié des directives assorties de pratiques recommandées pour la gestion des changements apportés aux programmes d'observation du climat (OMM, 2007). La présente publication met l'accent sur les SMA qui seront probablement utilisées pour l'établissement de relevés climatologiques sur le long terme. Ces stations seront en principe détenues par des SMHN ou des organismes qui leur sont associés, voire par des tiers (organismes opérant dans les secteurs de l'aviation, de l'agriculture ou du transport routier par exemple), selon des modalités approuvées par les SMHN. L'expérience montre que les SMA privées peuvent être utiles à certaines applications climatologiques (fourniture d'informations sur des phénomènes extrêmes ponctuels et localisés) mais qu'elles ont rarement les caractéristiques requises en termes de

durée d'enregistrement, de normes de précision ou d'exposition ou de stabilité des sites et des instruments pour être d'une réelle utilité aux activités de surveillance du climat sur des périodes d'une décennie ou plus.

L'automatisation des réseaux d'observation présente un grand nombre d'avantages mais entraîne également des difficultés pour la surveillance à long terme du climat. Tout changement apporté à un système d'observation est susceptible d'introduire dans les relevés climatologiques des défauts d'homogénéité qui doivent être évalués et corrigés s'il y a lieu. L'évaluation des défauts d'homogénéité sur un site particulier peut s'avérer particulièrement complexe si des changements similaires interviennent sur un grand nombre de sites (qui autrement pourraient servir de stations de référence) pendant un court laps de temps, comme l'explique le chapitre 4. Dans bien des cas, la mise en place de SMA s'accompagne également de déplacements de sites. Par ailleurs, l'introduction de ces stations peut signifier la fin de l'observation des variables qui sont difficiles à mesurer automatiquement (ou pour lesquelles les mesures automatiques ne sont pas directement comparables aux observations manuelles), comme par exemple la nébulosité, l'épaisseur de la couche de neige ou l'évaporation en bac. En outre, lorsque les SMA commencent à se généraliser au sein d'un réseau, il peut être difficile de recourir systématiquement aux mêmes types d'instrument en raison des politiques appliquées en matière d'appels d'offres ou de passation des marchés dans certains pays.

La présente publication doit être consultée conjointement avec d'autres publications de l'OMM, à commencer par le *Guide des instruments et des méthodes d'observation météorologiques* de la Commission des instruments et des méthodes d'observation (CIMO) (OMM, 2014; dénommé ci-après «guide de la CIMO»). Le guide de la CIMO fournit notamment des indications détaillées sur l'utilisation des SMA (partie II, chapitre 1). La présente publication se concentre sur les aspects des SMA qui sont pertinents pour les mesures climatologiques effectuées sur le long terme; les lecteurs trouveront dans le guide de la CIMO des informations détaillées sur les SMA en général. Le *Guide des pratiques climatologiques* (OMM, 2011) aborde dans son deuxième chapitre (Observations, stations et réseaux climatologiques) différents aspects des SMA et fait référence aux principes généraux adoptés par l'OMM pour la surveillance du climat dans le cadre du Système mondial d'observation du climat (SMOC). La publication intitulée «*Guidelines on Climate Metadata and Homogenization*» (Directives concernant les métadonnées climatologiques et l'homogénéisation) (OMM, 2003) contient des directives sur l'homogénéisation des données et les tests d'homogénéité (une mise à jour était prévue au moment de la rédaction de la présente publication).

2. ASPECTS GÉNÉRAUX OU PROPRES À DES ÉLÉMENTS PARTICULIERS DU PROCESSUS D'AUTOMATISATION DES MESURES

2.1 Aspects généraux

2.1.1 Exhaustivité des données

En conditions d'exploitation optimale, les SMA sont capables de fournir des flux de données dont la continuité et la résolution temporelle excèdent largement les capacités des observateurs les plus diligents. Elles peuvent fournir des données à des fréquences d'une minute ou moins, et fonctionnent tout aussi efficacement la nuit et le week-end que pendant la semaine de travail normale.

Les observations de type traditionnel et les observations automatisées peuvent connaître des interruptions dans la continuité des données, qui peuvent prendre diverses formes. Dans le cas des observations traditionnelles, les observations manquantes s'expliquent le plus souvent par l'absence de l'observateur, que celle-ci soit prévue (pas d'observations le week-end par exemple) ou non (si l'observateur est malade par exemple). La production d'observations peut également s'interrompre pendant de longues périodes, voire cesser totalement si un observateur quitte ses fonctions (du fait d'un départ à la retraite, d'une maladie ou d'un décès par exemple) et qu'il n'est pas possible de le remplacer rapidement – un risque qui se pose avec une acuité particulière dans les régions reculées faiblement peuplées. Dans le cas des observations traditionnelles, les

données manquantes peuvent être parfois dues à des pannes ou des dysfonctionnements des instruments, mais rarement à des défaillances des moyens de transmission étant donné qu'il est normalement possible de conserver les données en vue de leur transmission ultérieure.

Avec les systèmes automatiques, il n'est pas nécessaire qu'un observateur soit présent. Malgré tout, les systèmes électroniques sont plus sujets aux défaillances que les systèmes traditionnels (notamment ceux qui n'ont pas de pièces mobiles, par exemple les thermomètres et les pluviomètres) et peuvent être sensibles à des phénomènes comme la foudre (à laquelle les anémomètres, installés sur de hauts mâts, sont particulièrement exposés) ou bien connaître des pannes d'électricité (que le système soit alimenté par le secteur, par pile ou par l'énergie solaire). Les observations automatisées sont également sensibles aux dysfonctionnements du système de transmission, qui peuvent se produire au niveau de la station, au point d'entrée dans la base de données ou dans le réseau de télécommunications qui relie ces deux éléments. Les possibilités de récupération des données manquantes dépendent du moyen de transmission utilisé et de la mesure dans laquelle les données sont enregistrées et conservées sur place (et pendant combien de temps), entre autres facteurs. Lorsqu'un instrument ou un système de transmission tombe en panne, il faut généralement faire appel à une expertise technique spécialisée pour le remettre en marche ; *a contrario*, si un thermomètre se casse, par exemple, il peut être remplacé par un thermomètre de rechange conservé *in situ* ou expédié à la station en quelques jours. Lorsque les compétences techniques requises ne sont pas disponibles localement, en particulier dans les zones reculées, la panne peut durer longtemps. En Australie, depuis la mise en place des SMA, le pourcentage total de données manquantes est à peu près le même dans les deux types de stations, traditionnelles et automatiques, mais la durée moyenne des pannes est plus longue dans les stations automatiques. Des données provenant d'Australie et d'Espagne montrent par ailleurs que les SMA peuvent être sujettes à des pannes brèves et intermittentes qui se répètent sur une période prolongée. Ces pannes peuvent avoir une incidence sur les observations quotidiennes et donc sur les totaux et les moyennes mesurés sur de longues périodes.

2.1.2 **Types d'erreur spécifiques aux deux catégories de mesures**

Les systèmes traditionnels se prêtent à un large éventail d'erreurs humaines, dont sont exempts les systèmes automatiques. Ces erreurs comprennent notamment :

- a) La lecture erronée des instruments (par exemple, le fait de lire la mauvaise extrémité de l'index d'un thermomètre ou de se tromper de 5 ou 10 ° en lisant la valeur affichée);
- b) Les erreurs de transcription des données (par exemple, en saisissant les informations d'un formulaire papier dans une base de données);
- c) Les erreurs de calcul (par exemple, lorsque la pression au niveau de la station est convertie en pression au niveau moyen de la mer selon une procédure manuelle ou à l'aide de tables de recherche, ce qui est courant avec les données anciennes).

Pour certains éléments météorologiques, les observations traditionnelles sont par ailleurs inévitablement influencées par la faculté d'appréciation de l'observateur, qui varie elle-même selon le niveau de compétence, l'expérience et la diligence de ce dernier. On en a un exemple évident avec l'observation de la nébulosité, du type de nuage et de la hauteur des nuages, qui exige un degré d'appréciation considérable, raison pour laquelle les changements d'observateur entraînent fréquemment des défauts d'homogénéité dans les données (Jovanovic *et al.*, 2010). Il existe encore d'autres exemples, tels que l'estimation de la visibilité et l'observation du vent sur la base d'estimations sur l'échelle de Beaufort.

Si les sources d'erreur recensées ci-dessus sont totalement ou en grande partie éliminées avec les SMA, les systèmes automatiques peuvent produire des données erronées pour d'autres raisons, notamment à la suite de défaillances électroniques ou mécaniques. L'un des types d'erreur auquel les SMA sont particulièrement exposés résulte des fluctuations extrêmement brusques, appelées «pointes», d'une variable qui aboutissent souvent à des valeurs totalement invraisemblables (figure 1). Ces erreurs sont souvent dues à des surtensions ou à des interférences électriques survenant à un point quelconque du système. Dans les réseaux de

SMA les plus perfectionnés, qui disposent d'algorithmes pour écarter les données parasites (voir ci-après), ces erreurs posent de moins en moins problème; elles restent en revanche très problématiques dans les SMA de première génération ou moins perfectionnées, comme on en trouve parfois dans les pays en développement, ou qui existaient dans les pays développés dans les premières années d'utilisation de cette technologie. Des erreurs peuvent aussi se produire au niveau des systèmes internes des SMA, par exemple dans les algorithmes utilisés pour convertir les signaux émis par les instruments en valeurs de variables météorologiques. Détecter et corriger ces erreurs peut se révéler particulièrement difficile lorsque le logiciel qui équipe la SMA est livré par le fabricant sous la forme d'une «boîte noire» à laquelle le SMHN n'a pas directement accès.

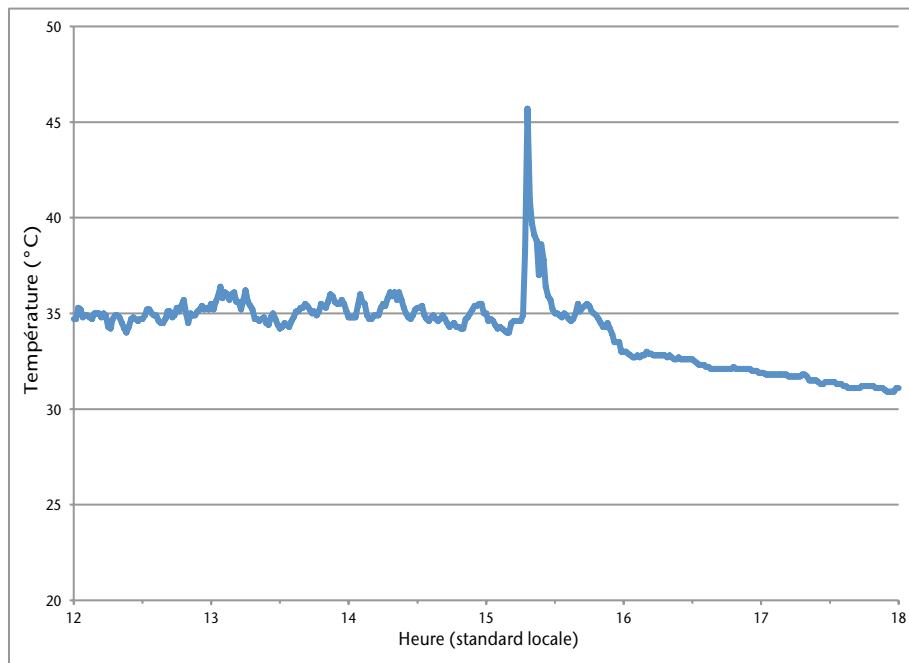


Figure1. Exemple de «pointes» de données: températures du thermomètre sec à Bulman (Australie), le 5 mai 2016

2.1.3 **Continuité des pratiques**

En général, il est souhaitable que les variables climatologiques mesurées par les stations automatiques soient définies de manière à coïncider aussi étroitement que possible avec les variables correspondantes mesurées par les stations traditionnelles. Cela s'impose particulièrement pour les variables définies sur une base quotidienne. La façon dont les variables quotidiennes sont calculées à partir des flux de données produits par les SMA (dont la résolution temporelle est souvent inférieure ou égale à une minute) revêt donc une grande importance.

Parce qu'elles sont capables d'une résolution temporelle plus élevée et qu'elles fonctionnent à toute heure de la journée, les stations automatiques offrent des possibilités de mesure dont sont dépourvues les stations traditionnelles. En voici deux exemples:

- a) Avec une station automatique, on peut sans difficulté fixer l'heure de fin de la journée climatologique à minuit, tandis qu'avec une station traditionnelle, il est souvent difficile de trouver des observateurs qui soient disponibles à minuit, ce qui oblige généralement à choisir une autre heure (par exemple, 09h00);
- b) Les stations automatiques sont capables de calculer une valeur moyenne quotidienne (la pression au niveau moyen de la mer par exemple) en continu à partir de la totalité des observations, tandis qu'aux stations traditionnelles, on ne peut utiliser qu'un petit nombre d'observations (par exemple, quatre observations effectuées toutes les 6 heures).

Dans ces conditions, même si les nouvelles possibilités offertes par les SMA peuvent représenter un «progrès», leur concrétisation peut s'accompagner de ruptures d'homogénéité dans les relevés climatologiques. Par ailleurs, des incohérences peuvent se manifester au sein d'un réseau d'observation si, par exemple, les relevés ne sont pas effectués au même moment par toutes les stations. Il est préférable de faire coïncider autant que possible les définitions applicables aux variables qui sont utilisées par les deux types de stations.

2.1.4 **Entretien, étalonnage et contrôles de tolérance**

L'OMM recommande que toutes les stations synoptiques terrestres et les stations climatologiques principales soient inspectées au moins une fois tous les deux ans (guide de la CIMO, partie I, section 1.3.5). Selon les directives de l'OMM, il convient de procéder aux vérifications recommandées par les fabricants et qui diffèrent d'un instrument automatique à l'autre. Les capteurs automatiques, en particulier ceux qui fonctionnent à l'électricité, peuvent présenter une dérive au fur et à mesure de leur utilisation, et il est important de les soumettre régulièrement à des contrôles de tolérance¹ pour assurer la stabilité et l'homogénéité des observations sur le long terme. Il est également souhaitable de procéder de temps à autre à des étalonnages plus rigoureux des capteurs, car sinon, la dérive des instruments risque d'engendrer des erreurs de mesure, qui peuvent de surcroît être difficiles à détecter si elles n'apparaissent que graduellement. L'absence de contrôles de tolérance ou d'étalonnages réduit également la traçabilité des données.

Malgré les inspections et opérations d'entretien régulières effectuées sur le terrain, les SMA ne sont pas à l'abri de pannes inopinées. Il est possible d'atténuer ce risque de plusieurs manières, par exemple en conservant des capteurs de rechange (en cas de défaillance d'un capteur individuel) ou en dotant la station de solides capacités d'enregistrement des données de façon à pouvoir les récupérer en cas de défaillance du système de transmission (ce qui nécessite une alimentation électrique adéquate). De nombreuses pannes peuvent être réparées sans intervention directe de l'opérateur du réseau d'observation, et certaines peuvent l'être par le personnel local; dans d'autres cas, il est nécessaire de faire appel à un personnel technique spécialisé.

L'un des scénarios fréquemment rencontrés est que l'instance qui a financé l'installation du réseau de SMA n'alloue qu'une enveloppe limitée, voire n'alloue aucun subside, pour les opérations d'entretien courant (programmées ou non). D'autres problèmes résident dans la pénurie de personnel technique suffisamment qualifié et la difficulté pour les techniciens de se rendre rapidement sur certains sites (ceux notamment qui sont très éloignés du siège du SMHN ou situés dans des zones difficiles d'accès, par exemple en haute montagne ou sur des îles au large).

Par conséquent, dans les pays où le soutien financier aux opérations d'entretien est limité ou inexistant, certaines SMA peuvent connaître des pannes prolongées ou d'autres défaillances (Page *et al.*, 2004). Ce problème se pose avec beaucoup d'acuité dans certains pays en développement, où les fonds disponibles (parfois fournis par des donateurs ou des organismes d'assistance) et l'expertise technique sont limités. Dans les pires cas, des réseaux de SMA sont devenus presque inopérants quelques années seulement après leur installation.

2.1.5 **Algorithmes de filtrage des pointes, d'échantillonnage dans le temps et autres**

Comme cela a été indiqué précédemment, l'un des problèmes de qualité des données fréquemment rencontré avec les SMA est l'occurrence de «pointes». L'application d'algorithmes permettant d'extraire ces pointes des flux de données dans le cadre du traitement des données tend à se généraliser. Néanmoins, dans les analyses climatologiques, les outils de contrôle de la qualité des données restent indispensables pour pouvoir détecter et isoler les valeurs erronées, en particulier dans les données anciennes. On ne peut en effet pas tenir pour acquis que les

¹ Les contrôles de tolérance sur le terrain sont fréquemment désignés par le terme «étalonnages», mais au sens strict, un «étalonnage» se limite à une comparaison avec un étalon officiel de référence.

normes de qualité qui s'appliquent aux données actuelles avaient déjà cours lors des premières années d'utilisation des SMA. Les pointes de données sont particulièrement problématiques pour l'analyse des conditions climatiques extrêmes qui, par leur nature, sortent souvent de la plage normale d'observations; à moins d'être filtrées, les données risquent en ce cas d'afficher de fausses valeurs extrêmes.

Les SMA utilisent une large gamme de matériels et logiciels pour convertir les signaux émis par les instruments (par exemple, la résistance électrique d'une sonde de température ou les signaux électriques émis à chaque rotation d'un anémomètre) en valeurs de variables météorologiques. Cette procédure nécessite également de sélectionner les fenêtres temporelles d'échantillonnage des variables. Dans certains cas, des changements de logiciel peuvent compromettre l'homogénéité des données pour une ou plusieurs variables climatologiques. Il est donc important que les changements de version de logiciel et le renouvellement des matériels internes (y compris des modules d'interface électroniques) soient consignés dans les métadonnées de la station. Autre difficulté, les SMA sont généralement équipées de logiciels propriétaires, et les exploitants des réseaux et utilisateurs des données ne sont pas toujours correctement informés des conséquences des changements de version effectués par les fabricants.

2.2 Éléments météorologiques

2.2.1 Température

La température est la variable pour laquelle les contrôles d'homogénéité sont les plus poussés. Par le passé, les profonds changements apportés aux techniques d'observation, notamment aux écrans ou abris utilisés pour protéger les instruments contre le rayonnement solaire direct ou indirect, ont introduit des défauts d'homogénéité parfois importants dans les relevés de température. Par exemple, l'installation, à la fin du XIX^e et au début du XX^e siècles, d'abris standard pour les instruments (abris Stevenson ou autres) dans de nombreux pays a entraîné un décalage généralisé des températures annuelles moyennes, de l'ordre de 0,2 °C (Parker, 1994), voire des changements beaucoup plus importants à certaines stations (cf. par exemple Brunet *et al.*, 2011; Ashcroft *et al.*, 2012).

Voici quelques-uns des changements qui peuvent poser problème pour la mesure automatique des températures:

- a) Changements concernant les instruments (abandon des thermomètres à liquide sous verre au profit de sondes électroniques);
- b) Changements apportés aux abris météorologiques;
- c) Modification des algorithmes de traitement des données (par exemple, fréquence des observations et définition de la moyenne quotidienne);
- d) Changements apportés aux heures d'observation ou à d'autres pratiques d'observation;
- e) Changements concernant les sites d'observation suite à l'établissement de stations météorologiques automatiques.

On croit parfois que le principal changement induit par le passage aux SMA est lié aux instruments. Cependant, dans les réseaux d'observation bien gérés, le système de mesure est correctement étalonné (au sens où des lectures ponctuelles sont effectuées par comparaison à un étalon de laboratoire), conformément aux procédures météorologiques standard (Bertiglia *et al.*, 2015), et les inhomogénéités constatées dans les relevés de température suite à la mise en place de SMA ont le plus souvent d'autres causes, comme il est indiqué ci-après.

a) Changements concernant les instruments

L'établissement de stations météorologiques automatiques s'accompagne presque systématiquement d'un changement d'instrument, les thermomètres à liquide (mercure ou alcool) sous verre à lecture manuelle étant généralement remplacés par des thermomètres à résistance de platine ou des appareils similaires.

La pratique optimale consiste à étalonner et tester les instruments (OMM, 2014). Dans les pays où l'on procède ainsi, les observations instantanées produites par un instrument manuel et un instrument automatique présentent rarement des différences importantes dans des conditions de laboratoire stables et contrôlées. Néanmoins, même si les instruments produisent des lectures instantanées identiques, leurs temps de réponse (c'est-à-dire le temps qu'il leur faut pour réagir à un changement instantané de la température de l'air) peuvent être différents. En règle générale, les observations non filtrées produites par les sondes automatiques ont un temps de réponse plus court que les thermomètres à liquide sous verre.

Il arrive que les sondes automatiques, une fois installées sur site ou au cours de leur transport, présentent une dérive par rapport à l'étalon, ce qui compromet l'homogénéité des relevés climatologiques. Pour prévenir cette situation, il est nécessaire d'inspecter régulièrement les sites (au minimum tous les 6 mois pour les SMA; OMM, 2011) et de procéder à des contrôles de tolérance ainsi qu'à des étalonnages par rapport à un instrument de référence. Certains pays n'ont pas les ressources nécessaires pour organiser des inspections fréquentes, ce qui accentue le risque de dérive des instruments.

b) Changements apportés aux abris météorologiques

Lorsqu'ils sont passés aux stations météorologiques automatiques, certains pays (comme l'Australie et le Canada) ont conservé les mêmes modèles d'abri, tandis que d'autres (comme le Royaume-Uni de Grande-Bretagne et d'Irlande du Nord) ont conservé la forme et les dimensions des abris précédents mais ont abandonné le bois au profit du plastique. Dans le cas du Royaume-Uni, Perry *et al.* (2007) ont constaté que les différences de température entre abris en plastique et abris en bois étaient inférieures à 0,1 °C en moyenne (et qu'elles étaient souvent inférieures aux différences observées entre des abris en bois occupant le même site). Lorsque c'est possible, il est préférable de conserver le même modèle d'abri de manière à éliminer une cause potentielle d'inhomogénéité.

Or, de nombreux pays ont adopté de nouveaux modèles d'abri – généralement de petits abris en plastique, moins chers et plus faciles à entretenir. Certains de ces nouveaux modèles donnent des résultats semblables (le plus souvent à 0,1 °C près) à ceux obtenus avec les traditionnels abris Stevenson en bois (Brandsma et van der Meulen, 2008). Mais dans d'autres cas, comme celui du passage des «Cotton Region Shelters» (CRS) à divers autres types d'abri aux États-Unis d'Amérique, les conséquences sur certaines variables de température sont de l'ordre de plusieurs dixièmes de degré. Il s'est avéré parfois que certains de ces nouveaux modèles se détérioraient considérablement au fil du temps, avec un impact sur la température maximale moyenne pouvant atteindre 0,5 °C sur une période de cinq ans (Lopardo *et al.*, 2014). Ces détériorations, lorsqu'elles se produisent, sont difficiles à détecter statistiquement ou par des inspections sur le terrain.

Des abris à ventilation artificielle ont été installés dans certains réseaux (par exemple, le réseau climatologique de référence (CRN) aux États-Unis; Diamond *et al.*, 2013), mais la plupart des réseaux opérationnels continuent d'utiliser des capteurs à ventilation naturelle.

La section 3.2 fournit de plus amples renseignements sur les comparaisons utiles en la matière.

c) Modification des algorithmes de traitement des données

En règle générale, comme cela a été indiqué au point a), les sondes automatiques utilisées dans les SMA n'ont pas les mêmes temps de réponse que les thermomètres à liquide sous verre. Le plus souvent, leurs temps de réponse sont plus courts, ce qui signifie qu'en comparaison des thermomètres à liquide sous verre, elles sont mieux à même d'échantillonner des fluctuations de

température de très courte durée et obtiennent donc des températures maximales plus élevées et des températures minimales plus basses. Cela entraîne un biais positif dans l'amplitude diurne de la température.

L'augmentation des températures maximales et la diminution des températures minimales peuvent partiellement s'annuler dans les températures moyennes, tout au moins dans les pays qui utilisent les maxima et les minima quotidiens pour calculer les températures moyennes. Il y a cependant des endroits (figure 2), en particulier dans les régions arides, où les fluctuations de température de très courte durée (moins d'une minute) sont plus marquées pendant la journée que la nuit (en raison de différences dans la structure de la couche limite, qui est souvent stable pendant la nuit et bien mélangée pendant la journée). Par conséquent, dans ces cas précis, la fréquence d'échantillonnage plus rapide des appareils entraînera une élévation des températures maximales plus importante que la baisse des températures minimales, d'où une modification des températures moyennes.

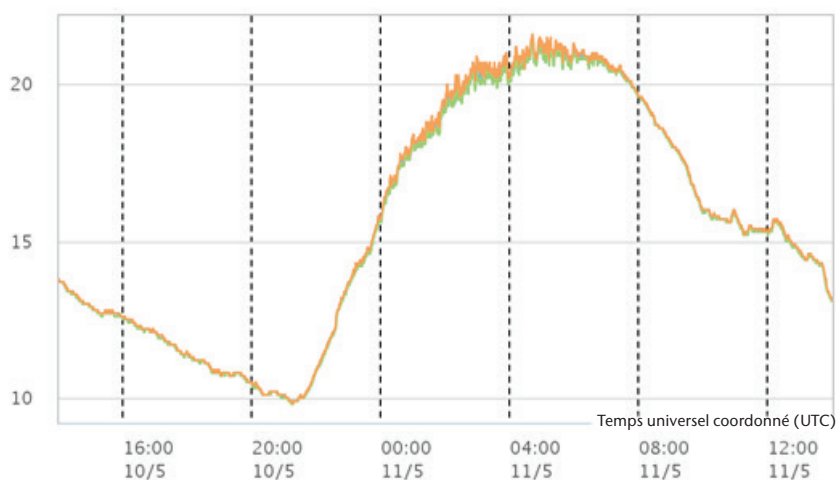


Figure 2 Graphique des températures (°C) à Birdsville (Australie), du 10 mai 2016 1400 UTC au 11 mai 2016 1400 UTC (du 11 mai 2016 0000 au 11 mai 2016 2400 en heure locale), représentant les fluctuations perceptibles minute par minute de 0000 à 0700 UTC environ (1000 à 1700, heure locale) le 11 mai 2016, entre la température maximale (ligne orange) et la température minimale (ligne verte) à chaque minute

Source: Bureau météorologique australien

Il est possible d'incorporer des filtres dans les algorithmes de traitement des données de manière à lisser les valeurs produites par les sondes automatiques vers les temps de réponse caractéristiques des instruments à liquide sous verre. Cela étant, ces procédures ne peuvent pas être exécutées en toutes circonstances, et l'on ne peut pas présumer qu'elles aboutissent à une concordance parfaite. De même, elles sont peu susceptibles de tenir compte de la variation des propriétés thermiques de l'abri dans les situations où la station automatique n'est pas équipée du même modèle d'abri que la station traditionnelle.

d) Changements apportés aux heures d'observation ou à d'autres pratiques d'observation

C'est un fait bien établi que les changements d'heures d'observation sont de nature à introduire des défauts d'homogénéité dans les relevés de température (Menne *et al.*, 2009; Vincent *et al.*, 2009)². L'automatisation des réseaux ne s'accompagne pas systématiquement d'un changement

² Bien que le cas examiné par Menne *et al.* (2009) ne se rapporte qu'en partie à l'introduction des stations météorologiques automatiques, il montre que la modification des heures d'observation sur une grande partie du réseau peut biaiser sensiblement les valeurs – en l'espèce, le remplacement systématique, dans de nombreuses stations, des observations effectuées l'après-midi par des observations effectuées le matin a introduit un biais négatif dans les températures moyennes.

des heures d'observation, mais elle peut le faciliter. À titre d'illustration, dans la mesure où les stations automatiques peuvent se passer d'observateurs humains, il devient beaucoup plus facile de mesurer les températures maximale et minimale sur les 24 heures du jour civil, c'est-à-dire de minuit à minuit. Comme il est dit plus haut, s'il est préférable de ne pas modifier les heures d'observation des variables quotidiennes lors de l'automatisation des stations, de tels changements ont souvent eu lieu par le passé.

La mise en place de stations météorologiques automatiques peut aussi influencer sur la précision des données. En effet, même s'ils ont pour instruction de relever les températures au dixième de degré près, les observateurs humains ont tendance à utiliser des chiffres ronds, de sorte que les valeurs se terminant par ,0 et, dans une moindre mesure, par ,5 sont surreprésentées (Trewin, 2002). Les stations automatiques devraient être affranchies de cette tendance, mais il a pu arriver que les valeurs affichées par ces stations soient arrondies au degré (à cause, par exemple, de contraintes liées aux codes de transmission des données, en particulier dans les SMA de première génération) dans des pays où la norme de précision habituelle est d'un dixième de degré. Pour autant qu'elle ne soit biaisée ni à la hausse ni à la baisse, la tendance à arrondir les valeurs devrait n'avoir qu'une incidence négligeable sur les valeurs moyennes; elle pourrait cependant avoir un effet perceptible sur la fréquence des dépassements de seuils (par exemple, le nombre de jours où la température est égale ou supérieure à 30 °C) (Zhang *et al.*, 2009; Trewin, 2012) et influencer aussi sur la variabilité météorologique observée.

e) Changements concernant les sites d'observation suite à l'établissement de stations météorologiques automatiques

L'automatisation des observations s'accompagne fréquemment d'un changement de site. Il y a plusieurs raisons à cela, mais il est courant qu'une situation manuelle implantée de longue date (pour des raisons historiques ou de disponibilité des observateurs) dans un environnement urbain soit transférée dans un environnement moins densément bâti (souvent un aéroport ou un lieu similaire). Le nouveau site est davantage susceptible de répondre aux normes en matière d'observation énoncées dans le guide de la CIMO, et pourra mieux se prêter à l'observation de variables telles que le vent, qui ne peuvent être observées de façon satisfaisante dans la plupart des milieux urbains. Autre cas de figure fréquent, une station peut être transférée dans un nouvel endroit difficilement accessible aux observateurs humains, mais plus représentatif pour d'importants groupes d'utilisateurs des informations recueillies – le centre d'un aéroport par exemple.

Si chaque changement de site a un impact bien spécifique sur les températures et d'autres variables, c'est un fait connu que les environnements urbains sont généralement plus chauds (surtout la nuit) que les environnements non urbains. Par conséquent, en l'absence d'autres influences (telles que la topographie locale ou la proximité d'une côte), le déplacement d'un site de l'intérieur vers l'extérieur d'une agglomération, opération dont s'accompagne fréquemment l'installation d'une SMA, entraîne souvent une baisse artificielle des températures minimales. Selon les caractéristiques de l'ancien et du nouveau site, il n'est pas rare qu'un déménagement en zone non urbaine entraîne une variation des températures minimales de 1 °C ou plus. De tels déplacements peuvent aussi influencer, quoique de façon moins systématique, sur les températures maximales et les températures moyennes quotidiennes.

2.2.2 **Précipitations**

Le principal changement induit par l'automatisation des stations sur le plan de la mesure des précipitations est l'abandon du pluviomètre à accumulation et lecture directe (constitué d'un collecteur de pluie, relevé et vidé à heure fixe) au profit du pluviomètre automatique. Le modèle de pluviomètre automatique le plus courant est le pluviomètre à augets basculants, dont le principe est le suivant: l'eau pénètre dans le pluviomètre par une ouverture et s'accumule dans un petit réceptacle qui bascule une fois qu'il est plein, produisant un signal qui est ensuite transmis. Un autre modèle couramment utilisé est le pluviomètre à pesée. Il existe également des pluviomètres qui mesurent le niveau d'eau dans un collecteur, et des pluviomètres non collecteurs faisant appel à des technologies comme la mesure d'impact, le

radar à hyperfréquences et le laser. Les pluviomètres non collecteurs sont davantage utilisés pour mesurer le temps présent que pour établir des relevés de cumuls de précipitations sur de longues périodes (Vuerich *et al.*, 2009).

Comme pour la température, l'impact du passage à des mesures automatiques peut être dû au changement d'instrument même ou bien à la modification de l'exposition ou de l'environnement de l'instrument. Comme c'est le cas pour tout changement de type d'instrument, les instruments traditionnels et les instruments automatiques peuvent présenter des différences systématiques, dont la nature dépend de l'instrument considéré.

L'influence de l'emplacement se fait surtout sentir dans les zones où le vent est suffisamment fort pour réduire la quantité de précipitations recueillies, le vent étant connu pour provoquer ce phénomène (Sieck *et al.*, 2007). Dans ce cas, un changement important des conditions de vent locales (qui peut résulter d'un déplacement de site même restreint) peut avoir une influence significative sur la quantité de précipitation recueillie et introduire ainsi un défaut d'homogénéité dans les relevés pluviométriques. Ce problème se pose avec une acuité particulière sur les sites très exposés au vent, notamment au sommet d'une montagne ou sur le littoral (près d'un phare par exemple), ou bien là où une proportion notable des précipitations tombe sous forme solide. L'emplacement a généralement moins d'importance dans les zones peu exposées au vent.

2.2.2.1 Incidence des pannes sur les données de précipitations

Bien que les opérateurs de réseaux météorologiques cherchent à limiter le plus possible les pertes de données, aucun réseau d'observation n'est à l'abri d'une panne. Les pannes sont particulièrement problématiques pour les valeurs cumulées, à commencer par les précipitations, car la perte de la moindre partie d'une journée d'observation entraîne la perte du total mensuel (annuel) pour le mois (l'année) considéré(e), à moins que les données portant sur la période manquante ne puissent être estimées à l'aide des stations voisines par exemple. (À l'inverse, la perte d'une journée d'observation des températures au cours d'un mois donné n'introduit normalement qu'une incertitude marginale dans la valeur mensuelle moyenne.) Ce problème est particulièrement handicapant pour les pluviomètres à augets basculants, qui doivent fonctionner en continu, alors qu'il est moins susceptible de toucher les pluviomètres à pesée selon le mode de configuration de l'acquisition des données.

Lorsque les données pluviométriques d'une station automatique sont manquantes pour une certaine période, les valeurs quotidiennes correspondantes peuvent être consignées comme manquantes ou comme nulles (hypothèse potentiellement fausse), selon la façon dont les valeurs sont intégrées dans la base de données. La deuxième de ces options introduit dans les relevés de précipitations un biais négatif dont l'ampleur dépend de la fréquence des pannes et des circonstances dans lesquelles elles se produisent. (Il est permis de supposer que les pannes surviennent plus fréquemment pendant des tempêtes, qui ont elles-mêmes tendance à s'accompagner de fortes précipitations, mais il ne semble pas que ce postulat ait été vérifié de manière objective.)

Avec des systèmes classiques, lorsque les observations d'une journée sont manquantes, il reste possible (en principe) de calculer un total sur plusieurs jours, de sorte que même si des observations quotidiennes sont perdues, ce n'est normalement pas le cas des observations du mois et de l'année. Les observations traditionnelles peuvent être néanmoins compromises par le débordement des pluviomètres lorsque le temps est très pluvieux, un phénomène qui peut conduire à une sous-estimation des précipitations extrêmes, voire à leur perte pure et simple. Ce type de défaillance est beaucoup plus rare avec des instruments automatiques.

2.2.2.2 Mesure des faibles précipitations

La mesure des faibles précipitations, par des instruments classiques ou automatiques, peut donner lieu à des erreurs systématiques susceptibles d'entacher la fréquence mesurée de ce type de précipitations lors de l'automatisation des stations.

L'expérience acquise en matière d'observations manuelles donne à penser qu'il est assez courant que de faibles hauteurs de précipitations (moins de 2 mm, et plus particulièrement moins de 1 mm) ne soient pas consignées, notamment sur les sites qui ne disposent pas d'observateurs professionnels. Selon une étude portant sur des données pluviométriques recueillies manuellement en Australie, plus de 50 % des précipitations quotidiennes inférieures à 1 mm sur l'ensemble du réseau n'ont pas été consignées (Trewin, 2001). Même si cette sous-estimation a peu d'effet sur les totaux mensuels et annuels (étant donné que les faibles hauteurs de pluie tombées restent en principe dans le pluviomètre et viendront s'ajouter aux précipitations suivantes plus conséquentes), elle a en revanche une incidence sur le nombre de jours de pluie observés et les indices construits à partir de cette variable³.

À l'inverse, les pluviomètres automatiques ne sont pas capables de distinguer avec certitude la pluie de la rosée ou du givre, ce qui peut conduire à un nombre exagéré de jours avec faibles précipitations, à moins d'une intervention manuelle pour éliminer les valeurs surnuméraires. Les pluviomètres à augets basculants peuvent également donner des résultats erronés, notamment lorsqu'un basculement est enregistré suite à une perturbation de l'appareil ou qu'un corps étranger pénètre dans le pluviomètre⁴.

On sait que les pluviomètres manuels peuvent sous-estimer les quantités à cause des pertes par mouillage associées aux faibles hauteurs de précipitations (un problème dont ne sont d'ailleurs pas exempts certains systèmes automatiques). Ce problème touche particulièrement les sites qui ont une fréquence élevée de très faibles précipitations, en particulier sous forme solide. Au Canada, les pertes totales par mouillage peuvent atteindre 15 à 20 % sur certains sites d'après les estimations (Goodison *et al.*, 1998). Ce régime de précipitations est typique des climats très froids, où les précipitations à l'état de traces peuvent représenter une part importante des précipitations totales.

2.2.2.3 Précipitations solides

La mesure des précipitations solides s'est longtemps révélée particulièrement délicate. Les instruments peuvent ne pas recueillir en totalité la neige qui tombe, même par vent léger, ou ne pas bien faire la distinction entre la neige qui tombe et la chasse-neige soulevée du sol. Entre les différentes méthodes utilisées pour mesurer les précipitations solides, il n'est pas rare d'observer des écarts d'un facteur de 2 ou plus, les différences étant encore plus marquées en cas de grand vent (Goodison *et al.*, 1998; Wolff *et al.*, 2014).

Entre 1986 et 1993, l'OMM a mené une grande étude comparative fondée principalement sur les observations de type traditionnel (Goodison *et al.*, 1998). D'autres observations ont été effectuées entre 2012 et 2015 dans le cadre d'une seconde étude comparative, la Comparaison OMM des systèmes de mesure des précipitations solides.

Bon nombre des problèmes posés par la mesure des précipitations solides sont communs aux instruments traditionnels et aux instruments automatiques. Ainsi, l'impact du vent sur la mesure des précipitations solides (sous-estimation de la quantité de neige qui tombe et effet de chasse-neige) est fonction de la position (hauteur et exposition) et de la taille de l'orifice collecteur, ainsi que de la mesure dans laquelle il est protégé du vent. La façon dont les précipitations sont mesurées une fois recueillies par l'instrument ne devrait pas influencer les résultats.

Les pluviomètres à augets basculants sont généralement conçus pour mesurer des liquides. Une technique courante consiste à chauffer l'orifice du pluviomètre pour faire fondre les précipitations qui s'y introduisent sous forme solide, afin que l'instrument puisse les mesurer en équivalent liquide (avec un léger décalage dans le temps). Ce peut être un moyen efficace de mesurer les précipitations solides, mais il est nécessaire que le système de chauffage fonctionne

³ C'est une des raisons pour lesquelles l'Équipe d'experts pour la détection des changements climatiques et les indices de changements climatiques utilise un seuil de précipitations journalières de 1 mm dans ses indices de précipitations.

⁴ Une valeur erronée de 0,2 mm a été enregistrée sur un site du nord de l'Australie en 2009, lors d'une journée où il n'y avait pas le moindre nuage à plusieurs centaines de kilomètres à la ronde. Il s'est avéré que ce faux résultat avait été provoqué par l'introduction dans l'orifice du pluviomètre de débris volants projetés par une tondeuse à gazon.

correctement. Une panne rendrait en effet l'instrument inopérant⁵, et même si l'appareil fonctionne correctement, les mesures peuvent présenter des erreurs systématiques (par exemple à cause de l'évaporation au niveau de l'orifice collecteur). Dans les cas où les instruments ne sont pas équipés de tels systèmes de chauffage (principalement dans les régions où les précipitations solides sont relativement rares), de la neige peut s'accumuler dans l'appareil et n'être mesurée qu'au moment de la fonte. Les précipitations risquent alors de n'être mesurées que longtemps après être tombées, même si la quantité totale est à peu près correcte et que la mesure n'a pas été faussée par des facteurs tels que l'obstruction de l'orifice par la neige. Les pertes par évaporation dues au chauffage peuvent être importantes, et Goodison *et al.* (1998) déconseillent de mesurer les précipitations solides avec des instruments chauffés dans les régions où les températures descendent au-dessous de 0 °C pendant des périodes prolongées.

Les pluviomètres à pesée, adaptés à la mesure des précipitations liquides ou solides, ne sont généralement pas chauffés. Les études comparatives laissent supposer qu'ils conviennent mieux aux régions où les précipitations solides tombent en abondance, même si des problèmes de qualité des données peuvent se poser là aussi (Goodison *et al.*, 1998).

Selon les résultats d'une enquête de la CIMO (OMM, 2010) portant sur neuf pays, 74 % des stations automatiques utilisaient à l'époque des pluviomètres à augets basculants chauffés pour mesurer les précipitations solides, et 23 % des pluviomètres à pesée.

2.2.3 **Humidité atmosphérique (humidité, point de rosée et tension de vapeur)**

Les observations traditionnelles de l'humidité atmosphérique sont généralement effectuées à l'aide de thermomètres secs et mouillés. À partir des valeurs qu'ils indiquent, on calcule la tension de vapeur actuelle et la tension de vapeur saturante selon la méthode psychrométrique; on peut calculer à partir de là le point de rosée et l'humidité relative.

Les stations automatiques emploient généralement l'un ou l'autre de deux instruments: une sonde mouillée, qui fonctionne dans le même type d'environnement qu'un thermomètre mouillé classique, ou un capteur d'humidité relative, qui mesure la variation de capacité d'un film mince, cette grandeur étant fonction de l'humidité relative.

Les mesures que donnent ces deux types d'instrument peuvent présenter des différences systématiques par rapport à celles qui sont tirées des appareils classiques (Lucas, 2010). Pour les méthodes fondées sur la température du thermomètre mouillé, l'équation utilisée pour calculer la tension de vapeur à partir des températures du thermomètre sec et du thermomètre mouillé fait intervenir une grandeur A, la constante psychrométrique. La valeur «réelle» de A est déterminée par plusieurs facteurs tels que la ventilation des instruments, la forme de la sonde mouillée ainsi que la longueur et la propreté de la mèche. Dans un contexte opérationnel, la valeur de A est généralement une constante appliquée dans l'ensemble du réseau national. Par conséquent, si, à la suite d'un changement de type d'instrument, la valeur «réelle» de A est modifiée sans que la valeur opérationnelle soit adaptée en conséquence, les valeurs de la tension de vapeur et les éléments associés présenteront des inhomogénéités.

Les capteurs d'humidité sont généralement utilisés sur les sites où il n'y a pas d'observateur en permanence, ou bien là où la température tombe régulièrement au-dessous de 0 °C. Ils sont conçus pour donner des résultats optimaux dans une plage d'humidité relative déterminée, et sont moins fiables à l'extérieur de cette plage. Cela peut entraîner des erreurs systématiques lorsque l'humidité est extrêmement élevée ou faible. Les changements observés en termes d'occurrence de taux d'humidité extrêmement faibles peuvent avoir des conséquences dans des domaines comme la surveillance des conditions météorologiques propices aux incendies, un taux d'humidité atmosphérique extrêmement faible constituant à cet égard un facteur de risque majeur. Les observations portant sur les conditions d'humidité extrêmement élevée sont essentielles à la détection du brouillard et de la brume, qui ont une grande incidence sur l'aviation et la navigation maritime.

⁵ L'expérience sur le terrain révèle que ces systèmes de chauffage manquent souvent de fiabilité et consomment beaucoup d'énergie.

Avec une sonde mouillée, il est nécessaire de compléter régulièrement le niveau d'eau du réservoir de l'instrument (comme c'est le cas avec un thermomètre mouillé). Si le réservoir s'assèche, la sonde se mettra à fonctionner comme une sonde sèche et affichera des points de rosée erronés car trop élevés et des taux d'humidité proches de 100 %. Ce type de défaillance peut survenir aussi bien avec les thermomètres mouillés classiques qu'avec les sondes mouillées automatiques. Cependant, sur les sites où les instruments sont régulièrement vérifiés (c'est-à-dire là où les observations sont effectuées par un observateur humain), les chances sont plus grandes pour que l'on remarque qu'un réservoir a besoin d'être rempli avant que le niveau d'eau n'atteigne un seuil critique de nature à fausser les observations.

La relation entre la tension de vapeur saturante et la température (et donc entre la tension de vapeur observée et le point de rosée) est largement non linéaire. Lorsque le point de rosée est inférieur à 0 °C, une variation absolue relativement modeste de la tension de vapeur (ou de la température du thermomètre mouillé) peut avoir un impact considérable sur le point de rosée. Par exemple, une diminution de la tension de vapeur de 1 hPa entraîne une diminution du point de rosée de 0,7 °C lorsque celui-ci se forme à 20 °C, de 2,4 °C à 0 °C et de 5,3 °C à -10 °C. De ce fait, c'est dans des conditions d'humidité extrêmement faible que les éventuels biais entre différents types d'instrument ont habituellement le plus d'impact sur les observations. À titre d'illustration, dans la ville d'Adélaïde, en Australie, le nombre moyen de jours où le point de rosée à 0900 (heure locale) est de -5 °C ou moins était de 0,2 par an entre 1978 et 1995, époque à laquelle on utilisait un thermomètre mouillé traditionnel, et 1,5 par an entre 1997 et 2015, les mesures étant alors réalisées avec une sonde mouillée automatique. À titre de comparaison, sur le site voisin de Parafield, où l'on a utilisé une sonde d'humidité à partir de 1990, la fréquence moyenne était de 0,5 jour par an.⁶

2.2.4 **Autres éléments**

Certains éléments traditionnellement observés à bien des stations de type classique soit ne peuvent absolument pas être mesurés par des instruments automatiques; soit sont des éléments pour lesquels l'observation automatique est encore balbutiante; soit peuvent être mesurés par des instruments automatiques, mais d'une manière qui n'est pas compatible avec les observations traditionnelles (même après ajustement des données); soit enfin sont des éléments pour lesquels l'automatisation des observations est encore largement expérimentale. Ces éléments sont les suivants: nébulosité, hauteur des nuages et type de nuage, évaporation en bac, temps présent, visibilité et épaisseur de la couche de neige.

L'automatisation des mesures signifie en principe que l'on cesse d'observer ces éléments. Dans les pays où une vaste partie du réseau a été automatisée ou est en train de l'être, les capacités d'observation de ces éléments peuvent donc se trouver réduites à un niveau qui ne permet pas d'effectuer des analyses nationales valables. (Par exemple, la mise à jour du jeu de données australien sur la nébulosité totale a été suspendue à la fin de 2015, faute d'un nombre suffisant de stations participantes; Jovanovic *et al.*, 2010.) Dans certains cas, on peut envisager des solutions pour remplacer les données traditionnelles. Il est par exemple possible d'analyser la nébulosité sur de longues périodes en fusionnant des données satellitaires avec des données de stations anciennes, et les données sur le rayonnement solaire, lorsqu'il en existe, peuvent servir à mesurer la durée d'insolation.

L'automatisation s'accompagne généralement d'un changement de type d'instrument pour l'observation du vent (ou du passage de l'estimation des vents par un observateur, sur la base notamment de l'échelle Beaufort, à des mesures instrumentales). Tout changement de type d'instrument est susceptible d'introduire dans les relevés un défaut d'homogénéité dont la nature dépend de l'instrument considéré et des algorithmes utilisés pour convertir en données exploitables les valeurs données par l'instrument (par exemple, la vitesse de rotation des coupelles d'un anémomètre).

⁶ Voir la section 3.4 pour de plus amples renseignements sur l'automatisation des instruments de mesure du point de rosée en Australie.

Un autre problème majeur pour l'observation du vent est dû au fait que l'automatisation entraîne un changement de site d'observation. Le plus souvent, la station est transférée d'un site urbain à un aéroport ou à une infrastructure analogue. La mesure du vent est extrêmement sensible à la présence d'obstacles à l'écoulement de l'air au voisinage du site d'observation. (Le guide de la CIMO recommande de positionner les instruments de mesure du vent de telle sorte que la distance entre l'anémomètre et un éventuel obstacle représente au moins 10 fois la hauteur de l'obstacle.) En conséquence, le transfert d'une station à un site plus dégagé – même si elle ne s'accompagne pas d'un changement d'instrument – devrait logiquement entraîner une augmentation de la vitesse observée du vent.

3. **EXEMPLES DE DÉFAUTS D'HOMOGENÉITÉ AVÉRÉS IMPUTABLES À L'AUTOMATISATION DES OBSERVATIONS**

3.1 **Introduction**

De nombreux pays ont maintenant acquis une certaine expérience en matière d'automatisation des observations. Les résultats obtenus ont été amplement documentés, mais sous une forme qui n'est pas toujours accessible (par exemple, de nombreux résultats d'essais sur le terrain réalisés par les SMHN ne sont consignés que dans des rapports internes, qui sont souvent difficilement accessibles aux personnes extérieures, quoique leur publication en ligne tende à se généraliser).

L'objectif de ce chapitre n'est pas de dresser un compte rendu exhaustif des études consacrées aux défauts d'homogénéité mais de donner au lecteur, exemples à l'appui, des indications générales sur la nature des différences entre observations traditionnelles et observations automatiques pour une série de variables.

L'Équipe scientifique pour les observations parallèles (Parallel Observations Science Team, POST) de l'Initiative internationale concernant les températures de surface (Venema *et al.*, 2016) est en train d'évaluer (au moment de la rédaction de la présente publication) des études de cas rendant compte de mesures traditionnelles et automatiques de la température et des précipitations menées en parallèle dans un grand nombre de pays. Les résultats préliminaires de ses travaux sont exposés ci-après.

3.2 **Température**

D'après les résultats préliminaires de l'équipe POST pour dix pays (Aguilar *et al.*, 2015), il ressort de la majorité des études que le biais moyen des températures moyennes consécutif à l'automatisation des observations était négatif (autrement dit, les observations automatiques donnaient des valeurs plus basses). Les biais moyens s'échelonnaient entre +0,19 °C au Pérou et -0,36 °C en Argentine, mais l'écart était beaucoup plus important pour certaines stations. Les biais étaient considérablement plus marqués pour l'amplitude diurne de la température, divergeant même dans certains pays selon qu'il s'agisse de la température maximale ou de la température minimale. En Espagne et en Suède, par exemple, le biais était positif pour la température maximale et négatif pour la température minimale, tandis qu'aux États-Unis (cas évoqué ci-après), le biais moyen s'établissait à -0,50 °C pour la température maximale mais était presque nul pour la température minimale. Il est à noter que les résultats indiqués ne font pas toujours la distinction entre les effets dus au changement d'instrument et les effets résultant des changements de site ou d'abri; dans certains pays, ces derniers ont eu à eux seuls un impact systématique (en Australie, par exemple, l'installation de certains équipements météorologiques automatiques s'est doublée d'un transfert de l'intérieur vers l'extérieur des villes, où les températures sont généralement plus basses).

L'un des cas d'automatisation qui a été étudié de près concerne les États-Unis où, entre 1984 et 1988, 60 % environ du réseau de stations d'observation de la température administré par le Service météorologique national a été automatisé, les instruments classiques (placés dans des habitacles en bois) étant remplacés par des instruments automatiques (dans des abris

multi-plateaux)⁷. Il ressort des analyses initiales fondées sur des comparaisons de stations opérationnelles (Quayle *et al.*, 1991) que le processus d'automatisation s'est traduit, en moyenne, par un biais de $-0,4$ °C pour la température maximale et de $+0,3$ °C pour la température minimale. Des comparaisons spécialement effectuées sur un site expérimental (Wendland et Armstrong, 1993; Doesken, 2005) ont corroboré cette conclusion pour la température maximale, et révélé par ailleurs que les écarts les plus grands étaient relevés en conditions de vent faible et de rayonnement solaire important. Peu de données font apparaître des différences significatives pour les températures minimales, ce qui donne à penser que les écarts de température minimale observés par Quayle *et al.* (1991) pourraient résulter du transfert des sites d'observation lié à l'automatisation (par exemple, installation des instruments automatiques sur des sites moins éloignés des bâtiments que ne l'étaient les instruments classiques qu'ils ont remplacés, afin de réduire la quantité de câbles requise). Hubbard et Lin (2006) abondent dans ce sens en faisant observer que, même si l'impact général sur l'ensemble du réseau des États-Unis, tel qu'il est indiqué par Quayle *et al.* (1991), est avéré, l'impact au niveau des stations individuelles est étroitement lié au site.

Les études menées sur d'autres composantes du réseau des États-Unis (le système d'observation automatique en surface (ASOS) déployé dans les grands aéroports et le réseau climatologique de référence (CRN), qui utilisent tous deux des modèles d'abri différents de celui du MMTS) ont également relevé des différences de l'ordre de quelques dixièmes de degré entre le MMTS d'une part et l'ASOS et le CRN d'autre part (Hubbard *et al.*, 2004; Sun *et al.*, 2005). Guttman et Baker (1996) sont cependant parvenus à la conclusion que les différences entre l'ASOS et les autres systèmes dépendaient du site, même dans les cas où les deux systèmes étaient installés dans le périmètre du même aéroport. Leeper *et al.* (2015) ont constaté que l'abri ventilé utilisé par le CRN donnait des températures maximales plus basses (de $-0,48$ °C en moyenne) et des températures minimales plus élevées ($+0,36$ °C) que le MMTS. Dans le contexte de l'automatisation de la mesure des températures, ces résultats ont mis d'autant plus en lumière la nécessité de faire la distinction entre l'impact du capteur, celui du modèle d'abri utilisé et celui d'autres changements tels ceux concernant le site d'observation.

Une étude a porté sur des observations effectuées en parallèle par des stations traditionnelles et par de nouvelles stations automatiques de type Campbell Scientific, de configuration standard, et ce sur 22 sites répartis sur le territoire canadien, dans le but de préserver la continuité des relevés climatologiques portant sur de longues périodes. La première étape a consisté à faire coïncider les fenêtres d'observation des températures maximale et minimale quotidiennes pour les paires de stations sélectionnées. Dans un deuxième temps, les biais ont été calculés et utilisés pour corriger les séries chronologiques issues des stations automatiques. Des périodes de chevauchement de deux et cinq ans ont été prévues pour l'analyse des biais. Il est apparu que la différence moyenne, en valeur absolue, entre stations d'une même paire atteignait $0,7$ °C pour la température maximale et $1,4$ °C pour la température minimale (Milewska et Vincent, 2016).

3.3 Précipitations

D'après les résultats préliminaires de l'équipe POST pour neuf pays (Stepanek *et al.*, 2015), la majorité des études parviennent au constat que les hauteurs de précipitations enregistrées par les instruments automatiques sont plus faibles que celles obtenues par les instruments classiques. L'ampleur moyenne du biais négatif est faible (moins de 5 % dans la plupart des pays considérés) mais les résultats sont très variables d'une station à l'autre, nombre d'entre elles affichant des biais supérieurs à +20 % ou inférieurs à -20 %. Il semblerait que les biais soient plus marqués pour les précipitations solides que pour les précipitations liquides, et pour les SMA de première génération que pour les instruments de conception plus récente. Comme pour la température, les résultats indiqués intègrent les effets des changements de site liés à l'automatisation, et il est probable qu'une bonne partie des écarts relevés par l'équipe POST résultent de ces changements

⁷ On parlera ici respectivement d'abris Stevenson et de systèmes de capteurs de température maximum - minimum (MMTS). Ces derniers ne sont pas entièrement automatiques en ce sens qu'ils transmettent des données numériques à un terminal (généralement situé dans les locaux de l'observateur), mais qu'une intervention manuelle est requise pour transmettre les données sur le réseau général de télécommunication.

et non du changement d'instrument (en particulier pour les précipitations solides, compte tenu de l'influence de la vitesse du vent sur la quantité de précipitation recueillie et de sa sensibilité à l'environnement local).

L'OMM a mené plusieurs projets de comparaison qui, même s'ils ne portaient pas sur les mesures de type classique, englobaient dans leur champ d'étude un large éventail de pluviomètres, analysés en laboratoire (Lanza *et al.*, 2006; Sevruk *et al.*, 2009) et sur le terrain (Vuerich *et al.*, 2009). Ces études ont montré que les pluviomètres à augets basculants non corrigés produisaient généralement des biais négatifs importants par rapport à l'étalon en cas de pluie de très forte intensité (souvent 15–20 % pour des intensités de 300 mm/h), mais que les biais étaient beaucoup plus réduits pour des pluies de moindre intensité (généralement moins de 5 % pour des intensités égales ou inférieures à 50 mm/h). Au vu de ces résultats, il est probable que les pluviomètres à augets basculants non corrigés accusent sur la durée des biais importants dans les régions climatiques où une proportion élevée des précipitations annuelles tombe sous forme d'épisodes très intenses, comme c'est le cas dans de nombreuses régions tropicales et subtropicales. Selon l'étude de Vuerich *et al.* (2009), les pluviomètres à augets basculants donnent des résultats globalement satisfaisants lorsque des facteurs de correction automatique liés à l'intensité des précipitations sont appliqués. Les comparaisons en question ne portaient pas sur les précipitations solides.

3.4 Autres éléments

La plupart des études publiées consacrées à l'automatisation des mesures ne portent que sur la température et les précipitations. Seules quelques-unes s'intéressent à d'autres variables.

Lucas (2010) et Gorman (2003) rendent compte de comparaisons portant sur la mesure, par des instruments classiques et automatiques, du point de rosée et de l'humidité en Australie (l'étude de Lucas s'appuie sur une analyse de régression appliquée aux composantes traditionnelles et automatiques du réseau, tandis que celle de Gorman part d'un essai sur le terrain). Lucas (2010) constate que les sondes mouillées automatiques du réseau australien obtiennent un point de rosée biaisé de $-0,5$ °C en moyenne et les capteurs d'humidité un point de rosée biaisé de $-0,3$ °C en moyenne par rapport aux thermomètres mouillés traditionnels (quoique le résultat dépende en partie du site dans le second cas). Pour sa part, Gorman (2003) relève des écarts importants entre les points de rosée mesurés par les sondes mouillées et par les capteurs d'humidité lorsque cette valeur est basse (généralement 3 °C ou plus lorsque le point de rosée est inférieur à -5 °C), écarts qu'il attribue à la valeur inappropriée de la constante psychrométrique A (voir la section 2.2.3). Ces résultats sont propres aux instruments et méthodes d'observation utilisés en Australie et ne s'appliquent pas nécessairement à d'autres instruments et réseaux.

4. DIRECTIVES APPLICABLES À L'AUTOMATISATION

4.1 Mesures effectuées en parallèle pour des systèmes traditionnels et des systèmes automatiques

En climatologie, la principale difficulté liée à l'automatisation des observations consiste à préserver l'homogénéité des données, aussi bien en termes de valeurs moyennes que d'extrêmes, sur une gamme étendue de variables. Comme cela a été indiqué précédemment, et pour les éléments passés en revue dans la section 2.2, la mise en place de stations météorologiques automatiques est susceptible d'introduire des défauts d'homogénéité dans les séries chronologiques de données climatologiques, tout comme les changements de site qui accompagnent souvent ce processus d'automatisation.

Ainsi est-il recommandé dans ce contexte d'effectuer des observations en parallèle avec les deux systèmes – traditionnels et automatiques – pendant un certain laps de temps. Les recommandations de l'OMM concernant la période optimale d'observations parallèles ne sont pas parfaitement cohérentes. Le guide de la CIMO suggère un minimum de 12 mois

pour la vitesse et la direction du vent, de 24 mois pour la température, l'humidité, l'insolation et l'évaporation, et de 60 mois pour les précipitations (le guide notant également «[qu']une période de transition de 24 mois [...] apparaît comme un compromis satisfaisant»). Le *Guide des pratiques climatologiques* (OMM, 2011) préconise une période de chevauchement d'au moins une année, et de préférence deux années ou plus. En pratique, la période requise est sans doute propre à chaque site et l'on ne peut pas toujours l'anticiper. Une durée de 24 mois peut suffire pour déterminer la présence ou l'absence d'une inhomogénéité majeure, mais ce n'est peut-être pas assez pour quantifier intégralement une éventuelle inhomogénéité (c'est-à-dire l'impact sur les valeurs extrêmes de la distribution et sur la moyenne). Plus le remaniement du système est important, plus grand est le risque de voir apparaître un défaut d'homogénéité majeur; si la station météorologique automatique est installée dans le même abri que l'instrument traditionnel qu'elle remplace, ce risque sera faible pour de nombreuses variables. Cependant, si le processus d'automatisation s'accompagne d'un changement de site important, le risque de voir apparaître un défaut d'homogénéité majeur augmentera. Il est donc préférable de se réserver la possibilité de prolonger la période d'observations parallèles dans l'éventualité où les analyses effectuées pendant la période initiale concluraient à l'existence d'écart notable.

Une bonne partie de ce chapitre est consacrée à l'utilisation des observations parallèles en général et peut donc s'appliquer à celles qui sont effectuées dans d'autres contextes que l'automatisation des observations (par exemple, un déplacement de site ne s'accompagnant pas d'un changement de type d'instrument).

Les directives concernant les métadonnées climatologiques et l'homogénéisation (OMM, 2003) donnent des recommandations détaillées pour la détection et la correction des défauts d'homogénéité des relevés climatologiques, qui ne sont pas abordées dans la présente publication.

4.2 **Essais préalables à la mise en service de stations météorologiques automatiques**

Le guide de la CIMO recommande de tester les nouveaux instruments avant de les installer dans les stations météorologiques automatiques, c'est-à-dire de procéder à des essais d'environnement et à des étalonnages en laboratoire ainsi qu'à des essais de fonctionnement sur le terrain. Les tests visent à déterminer la mesure dans laquelle l'instrument est conforme à la norme (si tant est qu'il en existe une) ainsi que la façon dont l'instrument se comporte sur le terrain par rapport à un étalon.

Les essais sur le terrain sont généralement menés sur un ou plusieurs sites expérimentaux conçus à cette fin. Lorsqu'ils sont motivés par la mise en place d'une station météorologique automatique, il y a lieu d'inclure dans les essais les instruments actuellement utilisés pour les observations de type traditionnel afin de pouvoir comparer les deux types d'appareil dans le même environnement. Un programme d'essais sur le terrain devrait comprendre au moins un cycle annuel complet et s'employer à isoler les différents éléments constitutifs du changement (par exemple en comparant un capteur classique et un capteur automatique placés dans le même abri).

Les essais d'environnement et les essais sur le terrain n'éliminent pas la nécessité d'effectuer des observations parallèles sur les différents sites où il est prévu d'automatiser les stations d'observation étant donné que des inhomogénéités peuvent surgir en fonction du site, c'est-à-dire des conditions locales. Malgré tout, si les essais en question permettent de conclure que la différence entre les deux systèmes est négligeable dans un contexte expérimental, cela réduit le risque d'un écart important sur un site donné (sous réserve que le déploiement des nouveaux instruments ne s'accompagne pas d'un changement de site majeur). Si, comme c'est fréquemment le cas, les stations météorologiques automatiques sont déployées sur une large fraction du réseau en peu de temps, l'absence de différences systématiques entre les mesures fournies par les instruments automatiques et celles obtenues à l'aide d'instruments traditionnels réduit aussi le risque qu'un biais apparaisse à l'échelle du réseau (voir la section 4.4).

4.3 Représentativité de la période d'observations parallèles

La période d'observations parallèles ne peut donner une indication valable des différences entre les deux systèmes d'observation que si elle est représentative des périodes antérieures et postérieures (c'est-à-dire, si l'ancienne station pendant la période d'observations parallèles est représentative de l'ancienne station telle qu'elle était exploitée avant la période d'observations parallèles, et si la nouvelle station pendant la période d'observations parallèles est représentative de la nouvelle station telle qu'elle sera exploitée à l'issue de cette période). Il est dès lors important que les séries chronologiques provenant des différentes stations soient examinées, en vue d'y détecter d'éventuels défauts d'homogénéité, pendant ou peu de temps avant/après la période d'observations parallèles. Il importe par ailleurs que celles-ci soient correctement effectuées; il est arrivé lors de comparaisons que les données d'observation «traditionnelles» soient relevées sur les instruments automatiques, ôtant à la comparaison une bonne partie de sa pertinence.

Les inhomogénéités constatées au cours d'une période d'observations parallèles peuvent être dues à un grand nombre de facteurs. Il arrive souvent que l'on décide de déplacer une station parce que la qualité de l'exposition du site d'observation est devenue mauvaise ou menace de l'être sous peu à cause de l'urbanisation. Si ce changement intervient pendant la période d'observations parallèles, il est probable qu'il rende l'ancien site non représentatif de sa fonction antérieure, et la période d'observations parallèles sera de ce fait non représentative.

Même en l'absence de disparités persistantes, les relations entre les variables météorologiques mesurées sur des sites d'observation parallèles peuvent être sujettes à des variations interannuelles. Il est par exemple probable que l'humidité du sol et la verdure de la végétation environnante aient davantage d'influence sur les températures en zone rurale qu'en milieu urbain, raison pour laquelle les différences de températures rurales/urbaines observées au cours d'une année exceptionnellement humide (ou sèche) pourraient ne pas être représentatives des conditions normales. Si la période d'observations parallèles s'étend sur plusieurs années, cela réduit le risque qu'elle coïncide avec une phase climatique inhabituelle, en particulier dans les régions qui sont très exposées aux effets du phénomène El Niño/oscillation australe ou qui, de manière générale, sont soumises à une forte variabilité interannuelle.

Si les observations parallèles couvrent une période suffisamment longue, une solution consiste, face à d'éventuelles inhomogénéités, à ne pas prendre en considération la portion non représentative de la période d'observations parallèles. Un exemple de ce cas de figure est présenté ci-après (figure 3). Dans ce cas précis, des observations ont été effectuées en parallèle sur les ancien et nouveau sites entre 1992 et 2002. Or des ruptures d'homogénéité ont été constatées, le nouveau site affichant un écart d'environ $-0,9$ °C en 1995 (dû à un changement d'algorithme de lissage des données lors de l'installation d'une nouvelle version de la station météorologique automatique), et l'ancien site un écart d'environ $+0,5$ °C en 1999 (dû au nombre croissant de bâtiments autour du site). En conséquence, seule la période 1995-1998 a été prise en compte pour déterminer l'écart constaté sur le long terme entre les deux sites. En fonction de la durée de la période d'observations parallèles et du moment auquel surviennent les éventuelles ruptures d'homogénéité, cette approche n'est pas toujours applicable. En ce cas, sans doute est-il préférable, pour obtenir de meilleurs résultats, d'ignorer la période d'observations parallèles et d'évaluer les problèmes d'homogénéité éventuels par d'autres moyens, par exemple en recourant à des stations de référence indépendantes de la région (voir ci-après).

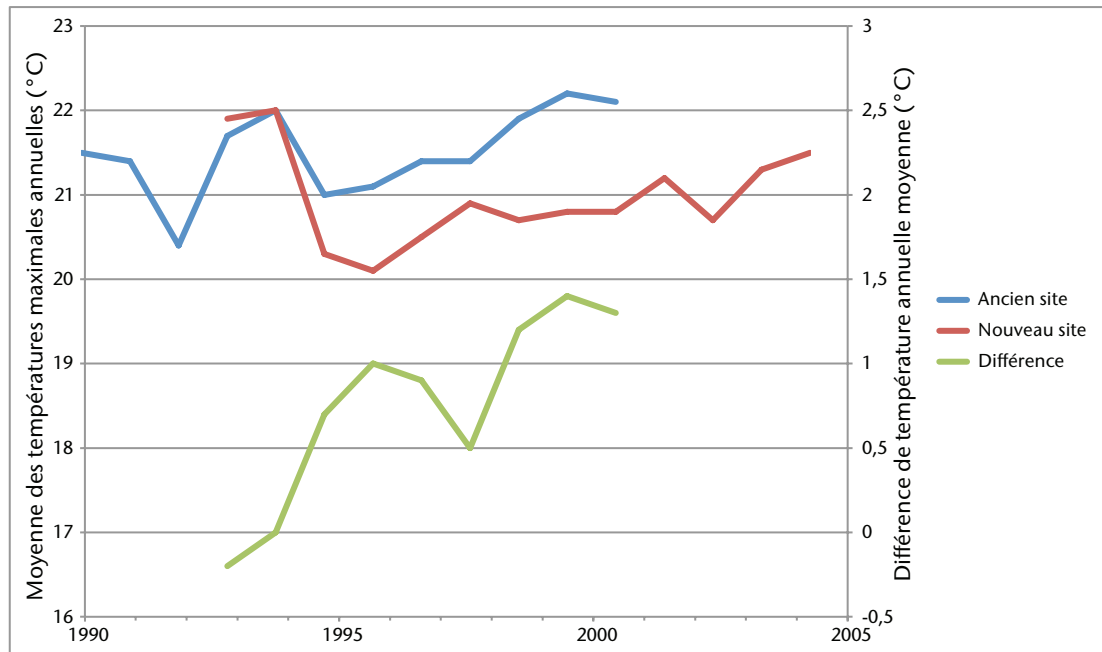


Figure 3. Moyenne des températures maximales annuelles à Port Lincoln (Australie) sur une période d'observations effectuées en parallèle dans une station traditionnelle située au centre-ville («ancien site») et dans une station automatique implantée dans l'aéroport, à 14 km au nord («nouveau site»)

4.4 Que faire en l'absence de période d'observations parallèles exploitable?

Si l'automatisation des observations passe en principe par des essais sur le terrain et une période d'observations parallèles durant la phase de déploiement, il arrive très souvent qu'on ne dispose d'aucune période d'observations parallèles exploitable. Cela peut tenir à plusieurs raisons, par exemple:

- L'automatisation a eu lieu il y a déjà un certain temps, et les dispositions en matière d'observations parallèles n'existaient pas à l'époque;
- Des observations parallèles ont été effectuées mais elles ne couvrent qu'un ensemble limité de variables;
- La période d'observations parallèles s'avère peu utile car les données enregistrées par la station traditionnelle ou la station automatique au cours ou au voisinage de cette période présentent des inhomogénéités;
- La période d'observations parallèles programmée a été interrompue prématurément car l'ancien site n'était plus disponible (par exemple, lorsqu'un changement de site est dû à l'urbanisation, le propriétaire du terrain qui abritait l'ancienne station peut décider de ne plus le louer, rendant impossible la poursuite des observations).

Dans chacun de ces cas, évaluer l'impact de l'automatisation se résume à évaluer l'ampleur d'une disparité éventuelle en s'appuyant sur des métadonnées (à supposer que la date d'installation de la station automatique soit connue). On a alors recours, le plus souvent, à des stations voisines (stations de référence).

Que faire lorsque des changements interviennent en même temps sur une large portion du réseau

L'homogénéisation des données climatologiques est particulièrement délicate lorsque des changements interviennent sur une large portion du réseau national au même moment. La raison en est que les méthodes d'homogénéisation les plus précises reposent sur l'utilisation

de données issues de stations de référence (stations qui sont bien corrélées avec la station candidate, et dont les données pour les quelques années qui précèdent et qui suivent la rupture d'homogénéité peuvent servir à détecter le défaut d'homogénéité et à évaluer son impact). Or, si une grande partie du réseau est concernée par les changements, de nombreuses stations de référence potentielles le seront aussi et ne pourront pas fournir d'indication valable de l'impact du défaut d'homogénéité. Autre problème: une rupture d'homogénéité qui touche une grande partie d'un réseau national peut se révéler significative à l'échelon national même si elle est négligeable quand elle concerne une station isolée. Par exemple, une disparité des températures de 0,2 °C sera probablement indétectable si elle concerne une station isolée mais peut se révéler significative à l'échelle du pays (dans le contexte d'une progression de l'ordre de 0,1 °C par décennie sur un siècle).

Ce problème est particulièrement aigu lorsque les changements sont simultanés, par exemple lors d'un changement national des heures d'observation. Le changement d'horaire d'observation intervenu au Canada en 1961, qui a consisté à déplacer la fin de la journée de 0000 UTC à 0600 UTC, a entraîné un écart de la température minimale compris entre -0,6 °C et -0,8 °C dans un grand nombre de stations de l'est du Canada (Vincent *et al.*, 2002). Un tel changement d'envergure nationale est plus rare dans le contexte de l'automatisation d'un réseau, car les stations météorologiques automatiques d'un réseau ne sont pas censées entrer en fonction toutes le même jour⁸. Il est cependant courant qu'un grand nombre de stations opèrent leur transition en l'espace de quelques années, un délai suffisamment court pour avoir un impact notable sur les pratiques d'homogénéisation.

Si l'on ne dispose pas d'observations parallèles adéquates, d'autres solutions existent:

- a) N'utiliser comme stations de référence que les stations qui ne sont pas concernées par le changement – c'est-à-dire celles qui n'ont jamais cessé de fournir des observations de type classique, ou éventuellement les stations automatiques qui ont été installées quelques années avant la mise en œuvre de changements plus vastes à l'échelle du réseau;
- b) En l'absence de telles stations de référence (par exemple lorsque l'ensemble du réseau est concerné par le changement), utiliser un jeu de données indépendant qui soit lié d'une manière ou d'une autre à la variable considérée. Dans le cas des températures à la surface des terres, il peut s'agir d'observations en provenance de pays voisins, des températures en altitude (par exemple, à 850 hPa) ou des températures de surface de la mer relevées à proximité, tandis que pour les mesures du vent (aux latitudes moyennes et élevées), les vents géostrophiques obtenus à partir de données sur la pression peuvent s'avérer utiles en tant que données de substitution. Il est peu probable que de tels jeux de données soient suffisamment bien corrélés pour produire des résultats utiles à l'échelon d'une station particulière, mais ils peuvent faciliter l'évaluation des incidences au niveau national ou régional;
- c) Procéder à un essai rétrospectif sur le terrain (ou exploiter les résultats d'un essai antérieur), consistant à comparer les stations automatiques actuellement en service avec une réplique des instruments traditionnels utilisés naguère, afin de déceler et de quantifier d'éventuelles différences de fonctionnement, qui pourront être ensuite extrapolées aux stations météorologiques automatiques de même type utilisées sur d'autres sites. Cette approche a été adoptée pour un certain nombre d'études qui visaient à déterminer les caractéristiques des abris utilisés pour les instruments de mesure de la températures au XIX^e siècle et avant (Brunet *et al.*, 2006, 2011; Böhm *et al.*, 2010).

Lorsque des changements de cette ampleur sont intervenus à l'échelle du réseau, il est jugé préférable d'évaluer leur impact global sur le réseau et de procéder aux ajustements nécessaires avant d'essayer d'homogénéiser les données au niveau de chaque station (Milewska et Vincent, 2016; Vincent *et al.*, 2017).

⁸ Il peut arriver néanmoins que les stations météorologiques automatiques deviennent la référence au même moment; ainsi, sur les principaux sites d'observation australiens qui étaient équipés des deux types d'instrument, traditionnels et automatiques, les observations automatiques ont été adoptées comme valeurs de référence le 1^{er} novembre 1996 pour la plupart des variables.

4.5 **Gestion des données au cours du processus d'automatisation des observations**

L'automatisation des observations soulève un certain nombre de défis sur le plan de la gestion des données.

Lorsqu'une station automatique est installée, il est recommandé de lui attribuer un nouvel indicatif afin que le changement soit aussi transparent que possible pour ceux qui utilisent les données. (Si des observations parallèles sont effectuées, comme cela est recommandé, un nouvel indicatif sera de toute façon nécessaire dans la mesure où les deux types de station – traditionnelles et automatiques – fonctionneront simultanément pendant un certain temps, à moins que la base de données climatologiques ne soit structurée de manière à pouvoir accepter des données provenant de capteurs multiples installés au même endroit.)

C'est un fait reconnu qu'un changement d'indicateur peut occasionner des problèmes pour certaines applications. Par exemple, l'absence d'une période de référence suffisamment longue peut empêcher le calcul de la normale climatologique pour une station automatique dotée d'un nouvel indicatif, et pour établir des relevés portant sur de longues périodes, il sera nécessaire de fusionner les données issues de deux ou plusieurs stations ayant des indicateurs distincts mais implantées à peu près au même endroit. Le mieux, dans ce cas de figure, est de constituer un jeu de données homogénéisé pour l'endroit en question. Cependant, s'il s'avère que les écarts entre stations traditionnelles et stations automatiques sont faibles, les séries pourront être fusionnées sans ajustement pour certaines applications (l'information du public par exemple); en revanche, pour les applications liées au changement climatique observé sur le long terme, il convient de toujours utiliser des données parfaitement homogénéisées.

5. **BIBLIOGRAPHIE**

- Aguilar, E., P. Stepanek, V. Venema, R. Auchmann, F.D. dos Santos Silva, E. Engström, A. Gilabert, Z. Kretova, J.A. Lopez-Díaz, Y.L. Rico, C.O. Rojas, M. Prohom, D. Rasilla, M. Salvador, G. Vetacnik, Y. Yosefi et M. de los Milagros Skansi, 2015: *Biases Found in Temperature Records by the Transition from Conventional to Automatic Measurements in European and American Parallel datasets*. Atelier EUMETNET sur la gestion des données, Saint-Gall, Suisse, 28–30 octobre 2015.
- Ashcroft, L., D. Karoly et J. Gergis, 2012: Temperature variations of south-eastern Australia, 1860–2011. *Australian Meteorological Oceanographic Journal*, 62:227–245.
- Bertiglia, F., G. Lopardo, A. Merlone, G. Roggero, D. Cat Berro, L. Mercalli, A. Gilabert et M. Brunet, 2015: Traceability of ground-based air-temperature measurements: a case study on the meteorological observatory of Moncalieri (Italy). *International Journal of Thermophysics*, 36:589–601, doi:10.1007/s10765-014-1806-y.
- Böhm, R., P.D. Jones, J. Hiebl, D. Frank, M. Brunetti et M. Maugeri, 2010: The early instrumental warm-bias: a solution for long central European temperature series 1760–2007. *Climatic Change*, 101:41–67.
- Brandsma, T. et J.P. van der Meulen, 2008: Thermometer screen intercomparison in De Bilt (the Netherlands) – Part II: description and modelling of mean temperature differences and extremes. *International Journal of Climatology*, 28:389–400.
- Brunet, M., J. Asin, J. Sigró, M. Bañón, F. García, E. Aguilar, J.E. Palenzuela, T.C. Peterson et P. Jones, 2011: The minimisation of the screen bias from ancient Western Mediterranean air temperature records: an exploratory statistical analysis. *International Journal of Climatology*, 31:1879–1895, doi:10.1002/joc.2192.
- Brunet, M., O. Saladié, P. Jones, J. Sigró, E. Aguilar, A. Moberg, D. Lister, A. Walther, D. Lopeza et C. Almarzae, 2006: The development of a new dataset of Spanish daily adjusted temperature series (SDATS) (1850–2003). *International Journal of Climatology*, 26:1777–1802.
- Claussnitzer, A., F. Maier et R. Spengler, 2015: *QualiMET2.0, the New Quality Control System of Deutscher Wetterdienst*. Atelier EUMETNET sur la gestion des données, Saint-Gall, Suisse, 28–30 octobre 2015.
- Diamond, H.J., T.R. Karl, M.A. Palecki, C.B. Baker, J.E. Bell, R.D. Leeper, D.R. Easterling, J.H. Lawrimore, T.P. Meyers, M.R. Helfert, G. Goodge et P.W. Thorne, 2013: U.S. Climate Reference Network after one decade of operations: status and assessment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94:424–448, doi:10.1175/BAMS-D-12-00170.1.

- Doesken, N.J., 2005: *The National Weather Service MMTS (Maximum-Minimum Temperature System) – 20 Years After*. Troisième colloque sur les observations et les instruments météorologiques, San Diego, 9–13 janvier 2005.
- Goodison, B.E., P.Y.T. Louie et D. Yang, 1998: *WMO Solid Precipitation Measurement Intercomparison* (WMO/TD-No. 872). Genève, Organisation météorologique mondiale.
- Gorman, J., 2003: *AWS Determination of Dew Point in the Field*. Technical Note 2003-0001. Melbourne, Bureau of Meteorology.
- Guttman, N.B. et C.B. Baker, 1996: Exploratory analysis of the difference between temperature observations recorded by ASOS and conventional methods. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77:2865–2873.
- Hubbard, K.G. et X. Lin, 2006: Re-examination of instrument change effects in the U.S. Historical Climatology Network. *Geophysical Research Letters*, 33:L15710, doi:10.1029/2006GL027069.
- Hubbard, K.G., X. Lin, C.B. Baker et B. Sun, 2004: Air temperature comparison between the MMTS and the USCRN temperature systems. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 21:1590–1597.
- Jovanovic, B., D. Collins, K. Braganza, D. Jakob et D.A. Jones, 2010: A high-quality monthly total cloud amount dataset for Australia. *Climatic Change*, 108:485–517.
- Lanza, L., M. Leroy, C. Alexandropoulos, L. Stagi et W. Wauben, 2006: *WMO Laboratory Intercomparison of Rainfall Intensity Gauges* (WMO/TD-No. 1304). Genève, Organisation météorologique mondiale.
- Leeper, R.D., J. Rennie et M.A. Palecki, 2015: Observational perspectives from U.S. Climate Reference Network (USCRN) and Cooperative Observer Program (COOP) Network: temperature and precipitation comparison. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 32:703–721, doi:10.1175/JTECH-D-14-00172.1.
- Lopardo, G., F. Bertiglia, S. Curci, G. Roggero et A. Merlone, 2014: Comparative analysis of the influence of solar radiation screen ageing on temperature measurements by means of weather stations. *International Journal of Climatology*, 34:1297–1310, doi:10.1002/joc.3765.
- Lucas, C., 2010: *A High-quality Historical Humidity Database for Australia*. CAWCR Technical Report 24. Melbourne, Centre for Australian Weather and Climate Research.
- Menne, M.J., C.N. Williams et R.S. Vose, 2009: The U.S. Historical Climatology Network monthly temperature data, version 2. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90:993-1007.
- Milewska, E.J. et L.A. Vincent, 2016: Preserving continuity of long-term daily maximum and minimum temperature observations with automation of reference climate stations using overlapping data and meteorological conditions. *Atmosphere-Ocean*, 54(1):32–47, doi:10.1080/07055900.2015.1135784.
- Organisation météorologique mondiale, 2003: *Guidelines on Climate Metadata and Homogenization* (WMO/TD-N° 1186). Genève.
- , 2007: *Directives pour la gestion des changements apportés aux programmes d'observation du climat* (OMM/DT-N° 1378). Genève.
- , 2010: *CIMO Survey on National Summaries of Methods and Instruments for Solid Precipitation Measurement at Automatic Weather Stations* (WMO/TD-No. 1544). Genève.
- , 2011: *Guide des pratiques climatologiques* (OMM-N° 100). Genève.
- , 2014: *Guide des instruments et des méthodes d'observation météorologiques* (OMM-N° 8). Genève.
- Page, C.M., N. Nicholls, N. Plummer, B. Trewin, M. Manton, L. Alexander, L.E. Chambers, Y. Choi, D.A. Collins, A. Gosai, P. Della-Marta, M.R. Haylock, K. Inape, V. Laurent, L. Maitrepierre, E.E.P. Makmur, H. Nakamigawa, N. Ouprasitwong, S. Mcgree, J. Pahalad, M.J. Salinger, L. Tibig, T.D. Tran, K. VEDIAPAN et P. Zhai, 2004: Data rescue in the southeast Asia and south Pacific region: challenges and opportunities. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85:1483–1489.
- Parker, D.E., 1994: Effects of changing exposure of thermometers at land stations. *International Journal of Climatology*, 14:1–31, doi:10.1002/joc.3370140102.
- Perry, M.C., M.J. Prior et D.E. Parker, 2007: An assessment of the suitability of a plastic thermometer screen for climatic data collection. *International Journal of Climatology*, 27:267-276.
- Quayle, R.G., D.R. Easterling, T.R. Karl et P.Y. Hughes, 1991: Effects of recent thermometer changes in the cooperative station network. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 72:1718–1723.
- Sevruk, B., M. Ondras et B. Chvila, 2009: The WMO precipitation measurement intercomparisons. *Atmospheric Research*, 92:376–380.
- Sieck, L.C., S.J. Burges et M. Steiner, 2007: Challenges in obtaining reliable measurements of point rainfall. *Water Resources Research*, 43:W01420.

- Stepanek, P., E. Aguilar, V. Venema, R. Auchmann, F.D. dos Santos Silva, E. Engström, A. Gilabert, Z. Kretova, J.A. Lopez-Díaz, Y.L. Rico, C.O. Rojas, M. Prohom, D. Rasilla, M. Salvador, G. Vetacnik, Y. Yosefi et M. de los Milagros Skansi, 2015: *Biases in Precipitation Records Found in Parallel Measurements*. Atelier EUMETNET sur la gestion des données, Saint-Gall, Suisse, 28–30 octobre 2015.
- Sun, B., C.B. Baker, T.R. Karl et M.D. Gifford, 2005: A comparative study of ASOS and USCRN temperature measurements. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 22:679-686.
- Trewin, B.C., 2001: *The Under-reporting of Small Daily Rainfall Amounts*. Forum australo-néo-zélandais sur le climat, Darwin, Australie, 18–21 septembre 2001.
- Trewin, B.C., 2002: *Extreme temperature events in Australia*. PhD Thesis, School of Earth Sciences, University of Melbourne, Australie.
- Trewin, B.C., 2012: *Techniques Involved in Developing the Australian Climate Observations Network – Surface Air Temperature (ACORN-SAT) Dataset*. CAWCR Technical Report 49. Melbourne, Centre for Australian Weather and Climate Research.
- Venema, V., R. Auchmann, E. Aguilar, I. Auer, C. Azorin-Molina, T. Brandsma, M. Brunetti, M. Dienst, P. Domonkos, A. Gilabert, J. Lindén, E. Milewska, O. Nordli, M. Prohom, J. Rennie, P. Stepanek, B. Trewin, L. Vincent, K. Willett et M. Wolff, 2016: *A Global Database with Parallel Measurements to Study Non-climatic Changes*. Assemblée générale de l'Union européenne des géosciences, Vienne, Autriche, 17–22 avril 2016.
- Vincent, L.A., E.J. Milewska, R. Hopkinson et L. Malone, 2009: Bias in minimum temperature introduced by a redefinition of the climatological day at the Canadian synoptic stations. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48:2160–2168, doi:10.1175/2009JAMC2191.1.
- Vincent, L.A., E.J. Milewska, X.L. Wang et M.M. Hartwell, 2017: Uncertainty in homogenized daily temperatures and derived indices of extremes illustrated using parallel observations in Canada. *International Journal of Climatology*, doi:10.1002/joc.5203.
- Vincent, L.A., X. Zhang, B.R. Bonsal et W.D. Hogg, 2002: Homogenization of daily temperatures over Canada. *Journal of Climate*, 15:1322–1334.
- Vuerich, E., C. Monesi, L.G. Lanza, L. Stagi et E. Lanzinger, 2009: *WMO Field Intercomparison of Rainfall Intensity Gauges* (WMO/TD-No. 1504). Genève, Organisation météorologique mondiale.
- Wendland, W.M. et W. Armstrong, 1993: Comparison of maximum-minimum resistance and liquid-in-glass thermometer records. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 10:233-237.
- Wolff, M.A., K. Iskasen, K. Ødemark, R. Brækken et A. Petersen-Øverleir, 2014: *How Much Snow is not being Measured?* Conférence technique de l'OMM sur les instruments et les méthodes d'observation météorologique et environnementale, Saint-Petersbourg, Fédération de Russie, 7–9 juillet 2014.
- Zhang, X., F.W. Zwiers et G. Hegerl, 2009: The influences of data precision on the calculation of temperature percentile indices. *International Journal of Climatology*, 29:321-327.

Pour de plus amples informations, veuillez vous adresser à:

Organisation météorologique mondiale

7 bis, avenue de la Paix – Case postale 2300 – CH 1211 Genève 2 – Suisse

Bureau de la communication et des relations publiques

Tél.: +41 (0) 22 730 83 14/15 – Fax: +41 (0) 22 730 80 27

Courriel: cpa@wmo.int

public.wmo.int