



# INSTRUMENTATION TSI

## POUR LA MESURE DES PARTICULES ATMOSPHERIQUES SELON CEN/TS 16976:2016 ET 17434:2020

GUIDE DE L'ACHETEUR POUR LA CONFORMITÉ AU CEN (FR)

### Contenu

Introduction.....	1
Section 1 : Échantillonnage et séchage.....	5
Section 2 : Dilution (facultative) .....	10
Section 3 : Mesure de l'humidité relative .....	12
Section 4 : Mesure de la concentration en nombre de particules .....	13
Section 5 : Mesure de la distribution de la taille des particules.....	20
La solution complète de TSI® pour la conformité avec les normes CEN/TS 16976:2016 et 17434:2020.....	30
Références .....	31

### Introduction

Si la qualité de l'air varie considérablement d'un pays à l'autre, la façon de la mesurer varie également. Plus précisément, dans le cadre de la mesure des aérosols atmosphériques, les deux approches de quantification les plus utilisées sont la mesure de la masse des particules (PM) et du nombre de particules (PN). Alors que les réglementations américaines et autres sont basées sur la masse des particules, on observe un mouvement croissant vers la quantification des particules en nombre.

Bien que des mesures du nombre de particules des aérosols atmosphériques soient effectuées depuis des années dans de nombreux pays, il a été difficile de pouvoir comparer utilement les données recueillies au niveau international. Cette difficulté est due au fait que les sites de mesure des particules utilisaient parfois des instruments d'échantillonnage, de conditionnement et de mesure des particules différents. « L'harmonisation » de ces aspects est essentielle pour comparer les données et tirer des conclusions pertinentes pour tous les domaines liés aux aérosols ambiants, notamment la réglementation des émissions, la santé publique et le climat.



## **Principes de base des normes CEN/TS pour la surveillance atmosphérique**

L'objectif global des normes CEN/TS<sup>1</sup> relatives à la surveillance atmosphérique est d'« harmoniser » les mesures effectuées. Cela signifie que pour que les données de surveillance atmosphérique soient conformes aux normes CEN/TS, elles doivent être recueillies à l'aide d'instruments d'échantillonnage, de conditionnement et de mesure des particules conformes. Ces normes précisent quelles instrumentations doivent être utilisées, quelles caractéristiques un instrument doit avoir et/ou quels critères il doit remplir, ainsi que la manière dont les données doivent être rapportées.

### **CEN/TS 16976**

Le CEN/TS 16976 « Air ambiant - Détermination de la concentration en nombre de particules de l'aérosol atmosphérique » concerne les mesures de la concentration en nombre de particules et a été publié en 2016.

### **CEN/TS 17434**

Alors que la norme CEN/TS 16976 concerne le nombre de particules, la norme CEN/TS 17434 « Air ambiant - Détermination de la distribution granulométrique de particules d'un aérosol atmosphérique à l'aide d'un spectromètre de granulométrie à mobilité électrique (MPSS) » concerne la distribution granulométrique. La dernière révision finalisée de la norme a été publiée en 2020.

### **Changements prévus dans les normes du CEN**

En 2021, la norme CEN/TS 16976 est en cours de révision, et est en passe de devenir une norme européenne. Plusieurs spécifications sont en cours de discussion pour modification. Les sujets qui sont en cours de discussion pour la révision comprennent :

- Résoudre certaines contradictions inhérentes entre les normes 16976 et 17434 sur certaines exigences spécifiques.
- Modification de l'exigence en terme de D50 pour le CNC de 7 nm à 10 nm.
- Limiter le point de coupure potentiel d'un cyclone pré-séparateur aux seules PM<sub>2,5</sub>.

Ces sujets sont pertinents pour les exigences du système telles que détaillées ci-dessous dans les tableaux [2](#), [5](#), [6](#), [10](#) et [14](#). Veuillez consulter ces tableaux, ainsi que le texte qui suit chacun d'eux, pour plus d'informations.

### **Pertinence de ces deux normes CEN**

Ces deux normes CEN sont pertinentes pour toute institution gouvernementale, privée ou universitaire qui a l'intention de mesurer les particules ultrafines et fines dans l'air ambiant. Bien que certains puissent envisager de ne suivre ces normes que partiellement, la comparabilité, la traçabilité et la reconnaissance des résultats sont établies par ces procédures harmonisées. Respecter les mesures prescrites, c'est assurer la réputation de l'évaluation de la qualité de l'air.

---

<sup>1</sup> CEN est l'acronyme de Comité européen de normalisation. Le CEN est une association - officiellement reconnue par l'Union européenne et par l'Association européenne de libre-échange - qui regroupe les organismes nationaux de normalisation de 33 pays européens. Le CEN s'engage à élaborer des normes européennes pour divers types de produits, matériaux, services et processus. TS signifie Spécification Technique. Une spécification technique est un document normatif établi par un organisme technique approprié au sein du CEN. Toutes les spécifications techniques sont approuvées par un vote des membres nationaux du CEN.

## Structure de ce guide de l'acheteur pour la conformité au CEN

Ce guide de l'acheteur est divisé en cinq sections. Chaque section est consacrée à une fonction principale de la surveillance des aérosols atmosphériques : [échantillonnage et séchage](#), [dilution](#), [mesure de l'humidité](#), [mesure de la concentration en nombre de particules](#) et [mesure de la distribution de la taille des particules](#).

Dans chaque section, ce guide utilise des tableaux pour détailler les exigences que les deux normes CEN (CEN/TS 16976:2016 et 17434:2020) spécifient pour l'instrumentation. Le cas échéant, les détails relatifs à des rubriques spécifiques d'un tableau peuvent être trouvés dans le texte qui suit ce tableau.

Après les exigences, une sous-section intitulée « La solution TSI® » est consacrée à l'instrument TSI® concerné pour démontrer comment l'instrument répond aux exigences énumérées. Enfin, une dernière section intitulée « [solution TSI® complète](#) » fournit une vue d'ensemble et démontre la conformité de tous les composants.

### Liste des tableaux

1 : Exigences de conception pour l'entrée d'échantillonnage (sans le sécheur).....	6
2 : Exigences de performance pour l'entrée d'échantillonnage (sans le sécheur).....	7
3 : Exigences de conception et de performance pour le système de séchage inclus dans l'entrée d'échantillonnage.....	8
4 : Exigences de conception et de performance du système de dilution (facultatif).....	10
5 : Exigences de performance pour le capteur d'humidité relative.....	12
6 : Exigences de conception du CNC.....	13
7 : Exigences pour les fabricants lors de la vérification des aspects généraux des performances des CNC.....	14
8 : Exigences lors de la vérification des aspects des performances du CNC liés au débit d'entrée du CNC.....	15
9 : Exigences lors de la vérification de l'efficacité de la détection du CNC.....	16
10 : Exigences lors de la vérification de la linéarité des mesures du CNC.....	17
11 : Exigences relatives à l'étalonnage annuel du CNC.....	18
12 : Exigences de conception des composants CNC et DMA d'un MPSS.....	21
13 : Exigences de conception des autres éléments d'un système MPSS (c'est-à-dire en dehors du CNC et DMA).....	22
14 : Exigences de performance relatives au flux d'aérosols dans le MPSS et à la concentration du nombre de particules mesurée par le MPSS.....	24
15 : Exigences de performance relatives à la plage de taille des particules et à la précision des mesures de la taille des particules et de la distribution des particules effectuées par le MPSS.....	25
16 : Exigences de l'étalonnage annuel du SSPM qui se rapportent aux caractéristiques générales d'un système MPSS.....	27
17 : Exigences relatives à l'étalonnage annuel du SSPM qui concernent les flux à l'intérieur d'un système SSPM et à la comparaison des mesures finales de ce système avec celles des instruments de référence.....	28
18 : Résumé du statut de conformité de tous les composants de la solution complète de TSI pour la surveillance conforme au CEN des particules atmosphériques ultrafines.....	30

## Liste des figures

1. Système d'échantillonnage des particules atmosphériques Modèle 3750200.....	9
2. Dilueur d'aérosol Modèle 3333-10.....	11
3. Capteur d'humidité et de température pour aérosols Modèle RHT3000. ....	12
4. Compteur de particules de condensation Modèle 3750-CEN7.....	19
5. Spectromètre de mobilité à balayage Particle Sizer™ Modèle 3938W50-CEN7.....	29
6. La solution de surveillance des particules ultrafines de TSI. Cette solution est conforme aux normes CEN 16976 et 17434, comme le résume le tableau 18. Dilueur (en option) et pompe non représentés.....	30

---

## Section 1 : Échantillonnage et séchage

Toute mesure ne peut être que représentative de l'échantillon qui a été prélevé pour l'analyse. Comme c'est le cas pour toute autre activité scientifique, il faut s'assurer que l'échantillon d'aérosol fourni à l'instrument de mesure des particules est représentatif de l'aérosol que l'on souhaite caractériser. Plus précisément, le processus d'échantillonnage et de conditionnement doit viser à préserver autant que possible la distribution de taille et la concentration de l'aérosol échantillonné. La condensation de l'eau provenant de l'air ambiant humide qui est échantillonné affecte les résultats des mesures et peut même endommager les instruments.

Un système d'échantillonnage conforme CEN comprend plusieurs éléments : une tête d'échantillonnage des PM10, un tube d'échantillonnage, un cyclone et un sécheur. L'utilisation du cyclone est facultative et dépend de la distribution granulométrique de l'aérosol à échantillonner. Les exigences de conception et de performance sont couvertes dans les tableaux suivants.

La dilution est facultative ; un dilueur ne doit être utilisé que dans certaines conditions, comme spécifié par la section 5.1.3 de la norme CEN/TS 16976:2016 (voir Tableau 4, ligne 1). Les exigences de conception et de performance pour le dilueur sont couvertes dans la « [Section 2 : Dilution \(facultative\)](#) » du présent document.

Dans les tableaux [1](#), [2](#) et [3](#), plusieurs lignes font référence à la fois à la norme CEN/TS 16976:2016 et à la norme 17434:2020. Dans ces cas, lorsqu'une citation de la norme est présentée, la citation est tirée du CEN/TS 16976:2016.

*(suite à la page suivante)*

## Échantillonnage : Exigences de conception

Tableau 1 : Exigences de conception pour l'entrée d'échantillonnage (sans le sécheur).

Poste de travail	Aspects de la conception		Section :		Exigence du CEN
			16976	17434	
1	Système global		7.1	8.1	<ul style="list-style-type: none"> <li>Le système d'échantillonnage doit amener un échantillon d'air ambiant de l'extérieur vers l'intérieur de la station de surveillance tout en préservant la distribution de taille des particules ultrafines dans cet air.</li> <li>Le système d'échantillonnage doit conditionner l'aérosol à une humidité relative et une température définies.</li> </ul>
2	Tête d'échantillonnage	Design	5.1.1	6.1.1	<ul style="list-style-type: none"> <li>La conception du système d'échantillonnage doit permettre que le processus d'échantillonnage aboutisse à un échantillonnage représentatif, même dans une large gamme de conditions de vent.</li> </ul>
3		Point de coupure			<ul style="list-style-type: none"> <li>L'air ambiant pouvant contenir des particules de l'ordre du micromètre, il faut utiliser une entrée qui élimine ces particules ; les entrées PM10 et PM2,5 sont autorisées.</li> </ul>
4	Pré-séparateur			7.1	<ul style="list-style-type: none"> <li>Un pré-séparateur doit être utilisé si l'aérosol à mesurer comprend une quantité non négligeable de particules plus grosses que celles qui peuvent être mesurées par le calibre de particules.</li> <li>Le pré-séparateur peut être un impacteur ou un cyclone, et peut être inclus soit dans l'instrument de granulométrie, soit dans le système d'échantillonnage.</li> </ul>
5	Tube d'échantillon	Vertical	5.1.1	6.1.1	<ul style="list-style-type: none"> <li>Le tube d'échantillonnage primaire doit idéalement être entièrement vertical.</li> </ul>
6		Échantillonnage de gaz			<ul style="list-style-type: none"> <li>L'échantillonnage des particules doit être effectué indépendamment de l'échantillonnage des gaz.</li> </ul>
7		Échantillonnage iso-axial			<ul style="list-style-type: none"> <li>Le système d'échantillonnage doit aspirer un débit d'air beaucoup plus important que celui requis par les instruments de mesure des particules. Le but de ce débit primaire plus important est de réduire les pertes de particules par diffusion.</li> <li>Le flux secondaire - la partie de ce flux primaire qui ira vers le ou les instruments - doit être échantillonné de manière isoaxiale (c'est-à-dire centrée) par rapport au flux primaire, et ce tube d'échantillonnage doit être court.</li> </ul>
8		Flux laminaire			<ul style="list-style-type: none"> <li>Dans le tube d'échantillonnage primaire, le flux d'air doit être laminaire, afin de réduire la perte de particules due aux turbulences dans le tube d'échantillonnage.</li> </ul>
9	Matériaux	Lignes d'échantillonnage	5.1.1		<ul style="list-style-type: none"> <li>Le système d'échantillonnage doit être fabriqué dans un matériau conducteur et résistant à la corrosion. Il doit avoir une surface lisse et être mis à la terre électriquement.</li> </ul>
10		Tuyau flexible		6.1.1	<ul style="list-style-type: none"> <li>Des tubes flexibles conducteurs peuvent être utilisés pour relier le système d'échantillonnage aux instruments, mais leur longueur doit rester courte (c'est-à-dire &lt;50 cm).</li> </ul>

Le pré-séparateur (ligne 4) est facultatif ; s'il est utilisé, il peut être logé soit dans le système d'échantillonnage, soit dans le MPSS. Se reporter à la ligne 1 du [tableau 13](#).

## Échantillonnage : Exigences de performance

Tableau 2 : Exigences de performance pour l'entrée d'échantillonnage (sans le sècheur).

Poste de travail	Aspects liés à la performance	Section :		Exigence du CEN	
		16976	17434		
1	Pertes par diffusion	5.1.1		<ul style="list-style-type: none"> <li>Les pertes par diffusion dans le système d'échantillonnage doivent être &lt;30% pour les particules de 7 nm.</li> </ul>	
2			6.1.1	<ul style="list-style-type: none"> <li>Les pertes par diffusion des particules dans le système d'échantillonnage doivent être déterminées et les données sur les particules doivent être corrigées en fonction de ces pertes.</li> </ul>	
3			8.3	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pour déterminer les pertes par diffusion des particules, des calculs théoriques peuvent être utilisés pour les géométries simples. Pour les géométries plus complexes, on peut utiliser soit une étude expérimentale des pertes, soit des données publiées par des pairs.</li> </ul>	
4	Laminarité	7.6		<ul style="list-style-type: none"> <li>On peut déterminer si l'écoulement dans le tube d'échantillonnage primaire est laminaire ou non en mesurant le débit d'échantillonnage primaire et en utilisant cette mesure ainsi que la géométrie du tube pour calculer le nombre de Reynolds. Le débitmètre utilisé pour mesurer le débit primaire doit avoir une précision supérieure à...</li> </ul>	5%
5			8.6		2%

La longueur équivalente du système d'échantillonnage (et donc les pertes par diffusion dans le système - voir la ligne 3) dépend des composants utilisés et de la longueur de ces composants. Certains aspects du système d'échantillonnage varieront nécessairement d'un endroit à l'autre - en particulier, la longueur du tube d'échantillonnage, l'ajout facultatif d'un cyclone (et s'il est inclus, le point de coupure du cyclone).

La résolution de la divergence concernant la précision des débitmètres (points 4-5) est soumise aux révisions des comités CEN. Les débitmètres TSI® répondent à la précision la plus stricte de  $\pm 2\%$ .

## Séchage : Exigences de conception et de performance

Il est essentiel que l'aérosol soit suffisamment séché (et de manière répétée sur tous les sites) avant la mesure. Cela présente plusieurs avantages. Premièrement, il garantit la précision des mesures de taille même lorsque les particules ont tendance à se développer dans des conditions humides en raison de leur composition chimique (hygroscopicité). Deuxièmement, cela permet de comparer les mesures de taille entre les sites puisque la croissance hygroscopique n'est plus un facteur de complication. Enfin, le séchage du flux d'échantillons (ainsi que des particules contenues dans ce flux) protège les instruments de la condensation, ce qui préserve leurs performances et prolonge leur intervalle de maintenance.

Tableau 3 : Exigences de conception et de performance pour le système de séchage inclus dans l'entrée d'échantillonnage.

Poste de travail	Aspects de la conception	Section :		Exigence du CEN
		16976	17434	
1	Influence des conditions ambiantes sur la configuration du séchage	5.1.2	6.1.2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La nécessité d'un séchage dépend des conditions ambiantes. Les normes CEN prévoient les trois scénarios suivants :               <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Pour les environnements chauds et très secs, aucun sécheur d'aérosols n'est nécessaire.</li> <li>○ Pour les environnements modérément humides, le flux secondaire doit être séché.</li> <li>○ Dans les environnements suffisamment humides où le flux d'échantillonnage primaire risque de se condenser après avoir été refroidi à la température de la station de surveillance à environnement contrôlé, le flux primaire doit être séché. Le flux secondaire peut nécessiter aussi un séchage supplémentaire.</li> </ul> </li> </ul>
2	Méthode de séchage	5.1.2	6.1.2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Trois techniques de séchage peuvent être utilisées pour sécher l'aérosol : sécheur par diffusion à base de silice, sécheur à membrane, dilution à l'air sec.</li> </ul>
3	Humidité admissible à l'entrée du CNC	7.4		<ul style="list-style-type: none"> <li>• L'échantillon séché doit avoir une humidité relative, mesurée à l'entrée de l'instrument, inférieure à 40 % (%HR). Le capteur d'humidité doit avoir une précision de 3 %, et l'exigence d'humidité de l'échantillon de 40 % doit tenir compte de l'erreur maximale du dispositif de mesure de l'humidité.</li> </ul>

## La solution TSI® : Système d'échantillonnage des particules atmosphériques 3750200

Le [Système d'échantillonnage des particules atmosphériques](#) de TSI® échantillonne et conditionne l'aérosol atmosphérique conformément aux exigences des normes CEN/TS 16976:2019 et 17434:2020, comme détaillé dans les tableaux [1](#), [2](#) et [3](#).

Le système d'échantillonnage est conçu spécifiquement pour l'échantillonnage des aérosols (ligne 6 du [tableau 1](#)) et fournit un échantillon représentatif de l'aérosol atmosphérique aux instruments de mesure des particules fixés à sa sortie. Les composants standards - dont une tête d'échantillonnage PM10 et un cyclone PM2.5 en option - amènent l'échantillon de l'extérieur avec un débit primaire laminaire élevé (16,67 L/min). Avec un débit secondaire maximal (débit d'aérosol sec) de 4 L/min, le système d'échantillonnage permet facilement l'utilisation simultanée de plusieurs instruments de mesure des particules pour une surveillance continue. Il est également possible de connecter des instruments de mesure des particules supplémentaires à des fins de comparaison temporaire.

Le sécheur utilisé dans le système d'échantillonnage est un sécheur à membrane (Nafion) (point 2 du [tableau 3](#)), et il atteint une humidité relative de <40 % lorsqu'une pompe suffisamment puissante est utilisée (point 3 du [tableau 3](#)). Pour les endroits où le point de rosée peut être supérieur à 25°C, le système d'échantillonnage peut être configuré avec une pompe qui fournit un vide plus poussé pour améliorer les performances du sécheur. Pour plus de détails sur les pompes, reportez-vous à la brochure Solution [US](#) et [A4](#).

L'humidité relative finale du flux d'aérosols prélevés est mesurée à l'aide du capteur d'humidité relative et de température RHT3000, présenté dans la [section 3](#). Ce capteur est compatible avec le compteur de particules et le spectromètre de mesure de taille des particules ; quel que soit l'instrument auquel il est connecté (via un câble USB), il enregistrera l'humidité de l'échantillon en même temps que les données sur les particules.

Les pertes par diffusion dans le système d'échantillonnage sont d'environ 27 % pour les particules de 7 nm (ligne 1 du [tableau 2](#)), en supposant une longueur de tube d'échantillonnage primaire de 1,5 m. Les longueurs effectives de tous les composants du système d'échantillonnage ont été déterminées (lignes 2 à 3 du [tableau 2](#)).

L'aspect dilution, facultative, de l'échantillon d'aérosols prélevé est décrit dans la [section 2](#).



Figure 1. Système d'échantillonnage des particules atmosphériques, modèle 3750200.

## Section 2 : Dilution (facultative)

Les concentrations en nombre d'aérosols peuvent varier considérablement selon le lieu. Certains endroits présentent à la fois une forte concentration de particules et un fort potentiel d'impact sur le bien-être humain, par exemple les carrefours, les aéroports ou les ports maritimes. Dans de tels endroits, la caractéristique même qui rend souhaitable la mesure des particules ambiantes - leur forte concentration - rend la tâche difficile. La dilution de l'échantillon d'aérosol avant la mesure peut résoudre ce problème.

Du point de vue des normes CEN/TS 16976:2016 et 17434:2020, la dilution est facultative et ne devrait être utilisée que lorsque les concentrations locales dépassent ce que le CNC peut traiter en comptage individuel des particules. Veuillez vous référer à la ligne 1 du [Tableau 4](#) et à la section 5.1.3 de la norme 16976.

Tableau 4 : Exigences de conception et de performance du système de dilution (facultatif).

Poste de travail	Aspects liés à la conception ou à la performance	Section :		Exigence du CEN	
		16976	17434		
1	Air sans particules	5.1.3		<ul style="list-style-type: none"> <li>Lorsqu'il n'est pas possible pour le CNC d'un site donné de mesurer avec précision les concentrations de particules sans utiliser le mode photométrique, l'échantillon doit être dilué en utilisant de l'air exempt de particules.</li> </ul>	
2	Précision du facteur de dilution	7.2		<ul style="list-style-type: none"> <li>Si la dilution est utilisée, le facteur de dilution doit être stable dans le temps, et il doit être précis dans...</li> </ul>	5%
3			8.2		6.5%

La stabilité du facteur de dilution (points 7-8) doit être de  $\pm 5\%$  selon la CEN/TS 16976, mais de  $\pm 6,5\%$  selon la CEN/TS 17434. La résolution de cette divergence est sujette à des révisions par les comités CEN. Comme décrit ci-dessous, le dilueur d'aérosol modèle 3333-10 de TSI® Incorporated contrôle le facteur de dilution dans la limite plus stricte de  $\pm 5\%$ .

## La solution TSI® : Dilueur d'aérosol modèle 3333-10

Certains sites de surveillance atmosphérique connaissent parfois des concentrations de particules supérieures à 100 000 particules/cm<sup>3</sup>. Dans ce cas, l'utilisation d'un dilueur permet de maintenir la concentration numérique dans la plage de mesure du CNC. Le [Dilueur d'aérosol 3333-10](#) dilue l'aérosol échantillonné conformément aux exigences de la norme CEN/TS 16976:2016, comme détaillé dans le [tableau 4](#).

Le dilueur d'aérosol fournit un taux de dilution de  $10 \pm 5\%$ . Un débit d'aérosol de 1 L/min à travers le dilueur est piloté par le CNC 3750- CEN (décrit ci-dessous). Le débit de dilution est surveillé par un débitmètre massique interne et contrôlé par un ventilateur interne pour maintenir le taux de dilution stable à long terme. Le taux de dilution, le débit du dilueur et d'autres paramètres peuvent être communiqués au CNC via une connexion USB en option.



Figure 2. Dilueur d'aérosol modèle 3333-10.

## Section 3 : Mesure de l'humidité relative

La mesure de la température et de l'humidité relative (%HR) dans le flux d'aérosol prélevé fournit des données précieuses, tant d'un point de vue scientifique qu'en ce qui concerne la conformité aux exigences du CEN.

### Exigences de performance

Le [Tableau 5](#) fournit les exigences de performance pour un capteur d'humidité relative, utilisé pour mesurer le (%RH) de l'échantillon d'air qui entre dans l'entrée du CNC.

Tableau 5 : Exigences de performance pour le capteur d'humidité relative.

Poste de travail	Aspects de la conception	Section :		Exigence du CEN	
		16976	17434		
1	Contrôle de l'humidité à l'entrée (ou aux entrées) de l'instrument	5.1.2	6.1.2	<ul style="list-style-type: none"><li>L'humidité relative de l'air échantillonné doit être contrôlée aux entrées de l'instrument.</li></ul>	
2	Précision du capteur d'humidité relative	7.4		<ul style="list-style-type: none"><li>Le capteur d'humidité relative doit être étalonné et capable de confirmer que les valeurs d'humidité mesurées entre 20 % et 80 % sont précises à...</li></ul>	3%
3			8.4		5%

La résolution de la divergence concernant la précision de la mesure de l'humidité (lignes 2-3) est soumise aux révisions des comités CEN. Les débitmètres TSI® satisfont à la précision la plus stricte de  $\pm 2\%$ . La solution TSI® discutée ci-dessous - le capteur d'humidité et de température RHT3000 - répond à la précision la plus stricte de  $\pm 3\%$ .

### La solution TSI® : Capteur d'humidité et de température pour aérosols Modèle RHT3000

Que l'air ambiant soit très humide ou très sec, il est nécessaire de s'assurer que l'échantillon d'air à l'entrée du CNC répond à l'exigence de  $<40\%$  (3%) d'humidité relative, comme spécifié dans la [section 7.4](#) de la norme CEN/TS 16976 (voir [Tableau 3](#), ligne 3).

Le [Capture d'humidité et de température des aérosols RHT3000](#) mesure à la fois l'humidité relative et la

température lorsque l'air passe dans le CNC. Il est conçu pour s'adapter directement à l'entrée des CNC de TSI®, et s'adapte également au spectromètre de mesure de taille de particules de TSI conforme à la norme CEN/TS 17434 ; voir la [section 5](#) pour plus de détails sur ce spectromètre. Le capteur communique avec les instruments via un câble USB. Lorsqu'il est connecté de cette manière, les données relatives à l'humidité relative et à la température sont stockées dans l'instrument en même temps que les données relatives aux particules.

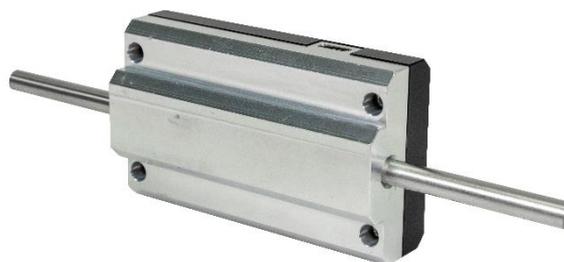


Figure 3. Capteur d'humidité et de température des aérosols, modèle RHT3000.

## Section 4 : Mesure de la concentration en nombre de particules

Les compteurs de noyaux de condensations (CNC) sont conçus pour mesurer la concentration en nombre des particules en suspension dans l'air. Les CNC peuvent détecter des particules d'une taille de quelques nanomètres (selon la conception du CNC), et sont utilisés pour surveiller l'air ambiant dans le monde entier depuis des années. Un CNC est spécifiquement requis par la norme CEN/TS 16976:2016 comme l'outil à utiliser pour mesurer l'aérosol atmosphérique.

La CEN/TS 16976:2016 spécifie les exigences relatives aux CNC qui concernent leur conception, leurs performances, leur fonctionnement et leur étalonnage. Les actions de maintenance à effectuer par les utilisateurs sont également spécifiées par la norme CEN, mais sortent du cadre de ce document. Pour des conseils sur la maintenance régulière, veuillez vous référer aux ressources TSI® dédiés (notamment les manuels et les guides de maintenance), et/ou contacter TSI® Incorporated.

### CNC : Exigences de conception

Tableau 6 : Exigences de conception du CNC.

Poste de travail	Aspects de la conception	Section en 16976	Exigence du CEN
1	Pas de mode photométrique	5.2.2	La CEN 16976 interdit l'utilisation du mode photométrique dans les CNC pour mesurer la concentration du nombre de particules.
2	Mode de comptage	6.2	<ul style="list-style-type: none"> <li>Tous les critères de performance font référence aux performances du CNC en mode de comptage (y compris la correction des coïncidences).</li> </ul>
3	Pas de division interne du flux		<ul style="list-style-type: none"> <li>La CNC doit être « à débit total », c'est-à-dire que le débit ne se divise à l'intérieur du CNC (c'est-à-dire d'une manière qui ne permet pas de vérifier de l'extérieur facilement le débit), et que la dilution interne n'est pas utilisée.</li> </ul>
4	Fluide de travail		<ul style="list-style-type: none"> <li>Le CNC doit utiliser du N-butanol comme fluide de travail.</li> </ul>
5	Moyenne des données		<ul style="list-style-type: none"> <li>Les données de concentration de particules produites par le CNC doivent être moyennées sur un intervalle d'une minute.</li> </ul>
6	Synchronisation de l'horloge		<ul style="list-style-type: none"> <li>L'horloge interne du CNC doit pouvoir être synchronisée.</li> </ul>
7	Données requises et paramètres de fonctionnement	<ul style="list-style-type: none"> <li>Les paramètres suivants doivent être enregistrés par le CNC par intervalles d'une minute : <ul style="list-style-type: none"> <li>Date et heure de chaque concentration mesurée</li> <li>Débit utilisé dans les calculs</li> <li>Concentration brute, avant application des corrections</li> <li>Températures de deux étapes clés de l'instrument CNC</li> <li>Température et pression associées à la mesure du débit</li> <li>Codes d'avertissements et d'erreurs des instruments</li> </ul> </li> </ul>	

## Exigences de performance

Dans la norme CEN/TS 16976:2016, la section 6.5 détaille non seulement *les* résultats que le CNC doit démontrer lorsqu'il est testé sur les différents aspects des performances du CNC, mais aussi la *manière dont* le fabricant doit réaliser ces tests. Dans le présent Guide de l'acheteur, cette section est divisée en quatre parties :

- Le [Tableau 7](#) porte sur les caractéristiques générales des CNC ;
- Le [Tableau 8](#) fait référence au débit à l'entrée du CNC ;
- Le [Tableau 9](#) fait référence à l'efficacité de la détection des CNC
- Le [Tableau 10](#) concerne la linéarité du CNC.

Tous les tableaux contiennent des informations sur la manière dont un *fabricant* doit tester les performances du CNC à ces égards, ainsi que les critères de performance associés pour le CNC testé. Les détails relatifs aux rubriques spécifiques de ces tableaux peuvent être trouvés dans le texte qui suit le tableau pertinent.

Tableau 7 : Exigences pour les fabricants lors de la vérification des aspects généraux des performances des CNC.

Poste de travail	Aspects liés à la performance	Section en 16976	Exigence du CEN
1	Conditions d'essai : température	6.3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les tests en laboratoire pour les caractéristiques de performance du CNC doivent être effectués de manière à ce que l'air entourant le CNC soit à 20 - 23 °C. Des exceptions sont spécifiées.</li> </ul>
2	Plage de mesure de la concentration en nombre	6.5.2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le CNC doit présenter une gamme de concentration (avec ou sans correction de coïncidence) telle que définie par : <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Une limite basse de concentration inférieure ou égale ou inférieure à 100 particules/cm<sup>3</sup></li> <li>○ Une limite haute de concentration supérieure ou égale à 10<sup>4</sup> particules/cm<sup>3</sup> (en tenant compte de la correction de coïncidence) ;</li> <li>○ Une gamme dynamique qui couvre au moins trois ordres de grandeur de concentration.</li> </ul> </li> </ul>
3	Limite basse de détection de la concentration	6.5.3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La limite de détection de la concentration en nombre doit être inférieure à 100 particules/cm<sup>3</sup>.</li> </ul>
4	Taux de comptage nul	6.5.7	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le taux de comptage nul (taux de faux comptage) du CNC doit être inférieur à une particule par minute, au cours d'un test de 60 minutes (ou plus) utilisant un filtre HEPA</li> </ul>
5	Temps de réponse	6.5.8	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le temps de réponse d'un CNC est une mesure de la rapidité avec laquelle il réagit à une variation brusque (c'est-à-dire un changement par palier) de la concentration en nombre de particules. La section 6.5.8 définit cette propriété, précise la façon dont l'essai doit être effectué et comment les données doivent être analysées.  <math display="block">t_{rise} &lt; 5 \text{ s} \quad t_{fall} &lt; 5 \text{ s} \quad \left  \frac{t_{rise} - t_{fall}}{t_{rise} + t_{fall}} \right  &lt; 10\% \text{ or } &lt; 0.5 \text{ s}</math> </li> </ul>
6	Précision de l'étalonnage des capteurs de température et de pression	6.5.10	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les capteurs de température et de pression doivent être étalonnés de manière appropriée pour garantir que les valeurs mesurées soient précises à 3 K et 1 kPa près, respectivement.</li> </ul>
7	Effet de la défaillance de la tension du réseau	6.5.11	<ul style="list-style-type: none"> <li>• En cas de perte d'alimentation électrique, les paramètres de l'instrument doivent être sauvegardés.</li> <li>• L'instrument doit automatiquement reprendre ses performances normales dès le retour de l'alimentation.</li> </ul>

Tableau 8 : Exigences lors de la vérification des aspects des performances du CNC liés au débit à l'entrée du CNC.

Poste de travail	Aspects liés à la performance	Section en 16976	Exigence du CEN
1	Conditions d'essai : température	6.3	<ul style="list-style-type: none"> <li>Les tests en laboratoire pour les caractéristiques de performance des CNC doivent être effectués de telle sorte que l'air entourant le CNC soit à 20 - 23°C. Les exceptions à cette exigence sont détaillées dans la norme, le cas échéant.</li> </ul>
2	Débit d'entrée, conditions d'essai : température	6.5.1	<ul style="list-style-type: none"> <li>Le débit à l'entrée du CNC doit être mesuré à l'aide d'un débitmètre de référence étalonné.</li> <li>Cette mesure doit être effectuée à une pression atmosphérique supérieure à 900 hPa, et à la fois à 15°C et 30°C.</li> </ul>
3	Débit d'entrée, conditions d'essai : pression		<ul style="list-style-type: none"> <li>Le débit d'entrée du CNC doit être mesuré à une température comprise entre 20 et 23°C.</li> <li>Cette mesure doit être effectuée à deux pressions atmosphériques : une supérieure à 900 hPa et une autre inférieure d'au moins 200 hPa par rapport à la première.</li> </ul>
4	Précision du débit d'entrée		<ul style="list-style-type: none"> <li>Le débit d'entrée du CNC doit être mesuré à l'aide d'un débitmètre de référence dont l'incertitude élargie est <math>\leq 2\%</math> (intervalle de confiance de 95 %).</li> <li>Le débit d'entrée mesuré par ce débitmètre de référence doit différer du débit nominal de <math>\leq 5\%</math>, et du débit certifié en usine de <math>\leq 2\%</math>.</li> </ul>
5	Dépendance du débit par rapport à la tension d'alimentation	6.5.9	<ul style="list-style-type: none"> <li>Le débit d'entrée du CNC ne doit pas varier de plus de 5% lorsque la tension d'alimentation du CNC (ou de la pompe externe, si utilisée) varie.</li> <li>Ceci sera déterminé en mesurant le débit d'entrée du CNC en utilisant des tensions d'alimentation de 210 V, 230V et 245V.</li> </ul>

Tableau 9 : Exigences lors de la vérification de l'efficacité de la détection des CNC.

Poste de travail	Aspects liés à la performance	Section en 16976	Exigence du CEN
1	Conditions d'essai : température	6.3	<ul style="list-style-type: none"> <li>Les tests de laboratoire pour les caractéristiques de performance des CNC doivent être effectués de telle sorte que l'air entourant le CNC soit à 20 - 23°C. Les exceptions à cette exigence sont détaillées dans la norme, le cas échéant.</li> </ul>
2	Conditions d'essai : pression	6.5.5	<ul style="list-style-type: none"> <li>L'efficacité de détection du CNC doit être mesurée conformément à la norme ISO 27891, en utilisant des particules d'argent de certaines concentrations et tailles.</li> <li>Cette mesure doit être effectuée à deux pressions (une pression atmosphérique supérieure à 900 hPa et une seconde pression inférieure d'au moins 200 hPa), et à deux températures (15°C et 30°C).</li> </ul>
3	Composition, concentration et taille des aérosols		<ul style="list-style-type: none"> <li>L'efficacité de détection du CNC doit être mesurée conformément aux exigences de la norme ISO 27891.</li> <li>L'aérosol utilisé doit avoir des caractéristiques spécifiques quant à sa taille, sa concentration et sa composition chimique.</li> <li>Le CNC doit présenter une D50 de 7 nm ±0,7 nm.</li> <li>Le CNC doit présenter un D90 de &lt;14 nm.</li> </ul>
4	Limite haute de détection de la taille des particules	6.5.6	<ul style="list-style-type: none"> <li>L'efficacité de détection du CNC pour les grosses particules (1000 nm) doit être déterminée.</li> <li>Le CNC doit présenter une efficacité de détection &gt;90% à 1000 nm ±100 nm.</li> </ul>

La mesure de la concentration numérique des aérosols dépend de la capacité à détecter la présence d'une particule. Comme le suggère leur nom (compteurs de noyaux de condensation), les CNC condensent une vapeur sur les particules afin de les faire croître suffisamment pour être détectées. Différents modèles de CNC peuvent y parvenir pour des particules de différentes tailles. Le D50 d'un CNC est la taille de particule à laquelle le CNC peut détecter avec succès 50% des particules. La D50 est une spécification fondamentale d'un CNC, et varie selon le modèle de CNC.

Comme mentionné plus haut dans ce document (partie « [Changements anticipés aux normes CEN](#) » de l'[introduction](#)), l'un des changements anticipés à la CEN/TS 16976 est que le D50 du CNC passera de 7 nm (comme indiqué à la ligne 3) à 10 nm. Reportez-vous à la section « [La solution TSI®](#) » : [Compteur de noyaux de condensation \(CNC\) 3750-CEN7](#) », ci-dessous, pour plus de détails.

Tableau 10 : Exigences lors de la vérification de la linéarité des mesures du CNC.

Poste de travail	Aspects liés à la performance	Section en 16976	Exigence du CEN
1	Conditions d'essai : température	6.3	<ul style="list-style-type: none"> <li>Les tests de laboratoire pour les caractéristiques de performance des CNC doivent être effectués de telle sorte que l'air entourant le CNC soit à 20 - 23°C. Les exceptions à cette exigence sont détaillées dans la norme, le cas échéant.</li> </ul>
2	Conditions d'essai (pression)	6.5.4	<ul style="list-style-type: none"> <li>La linéarité de la réponse du CNC doit être déterminée en comparant les performances du CNC à celles d'un instrument de référence. L'aérosol utilisé dans ce test doit être des billes d'argent, et avoir des concentrations en nombre comme spécifié.</li> <li>Cette mesure doit être effectuée à deux pressions (une pression atmosphérique supérieure à 900 hPa et une seconde pression inférieure d'au moins 200 hPa), et à deux températures (15°C et 30°C).</li> </ul>
3	Composition et taille de l'aérosol		<ul style="list-style-type: none"> <li>Pour évaluer la linéarité du CNC, il faut suivre la procédure de la norme ISO 27891.</li> <li>L'aérosol utilisé pour évaluer la linéarité du CNC doit être composé de billes d'argent, et avoir une taille de 40 nm ±10 nm.</li> </ul>
4	Concentration en nombre de l'aérosol d'étalonnage		<ul style="list-style-type: none"> <li>La linéarité du CNC doit être évaluée en présentant au CNC des concentrations de « défi » d'environ 1 000 particules/cm<sup>3</sup>, et en augmentant d'un facteur deux jusqu'à ce que la mesure finale soit prise à une concentration proche de la limite supérieure du CNC en mode comptage.</li> </ul>
5	Correction des coïncidences		<ul style="list-style-type: none"> <li>Les mesures de concentration du nombre effectuées pendant l'évaluation de la linéarité du CNC doivent être corrigées en fonction de la coïncidence.</li> </ul>
6	Particules à charges multiples		<ul style="list-style-type: none"> <li>Des corrections pour les particules à charge multiple doivent être effectuées si leur présence est avérée et si un électromètre pour aérosols est utilisé comme instrument de référence.</li> </ul>
7	Analyse des données		<ul style="list-style-type: none"> <li>Les données de l'évaluation de la linéarité du CNC doivent être analysées en effectuant une analyse de régression.</li> <li>La pente résultante doit être de 1 ±0,05.</li> <li>Les résidus qui en résultent doivent être &lt;4%.</li> </ul>

## Exigences d'étalonnage régulier

Tous les CNC utilisés dans le cadre de mesures de conformité CEN doivent faire l'objet d'un étalonnage annuel, conformément à la section 9.2.3 du document CEN/TS 16976:2016.

Tableau 11 : Exigences de l'étalonnage annuel du CNC.

Poste de travail	Aspects de l'étalonnage	Section en 16976	Exigence du CEN
1	Région du plateau	9.2.3	<ul style="list-style-type: none"><li>• L'efficacité de détection du CNC dans la région du plateau de sa courbe d'efficacité de détection doit être évaluée à la fois sur une base « tel-quel » et également après toute maintenance.</li><li>• Cette évaluation doit être conforme aux exigences de la norme ISO 27891 et doit utiliser des billes d'argent d'une taille comprise entre 30 et 50 nm.</li><li>• L'efficacité de détection des CNC qui en résulte doit être de <math>0,95 \leq \eta(D_p) \leq 1,05</math>.</li><li>• Si le CNC présente une efficacité de détection en dehors de cette plage, une maintenance supplémentaire est nécessaire.</li></ul>
2	Linéarité		<ul style="list-style-type: none"><li>• La linéarité du CNC doit être évaluée en utilisant la même procédure que celle utilisée pour évaluer l'efficacité du comptage de la région du plateau.</li><li>• Les résidus résultant d'une analyse de régression de ces données doivent être &lt;4%.</li><li>• Si les résidus dépassent 4 %, un entretien supplémentaire est nécessaire.</li></ul>

En général, les CNC nécessitent au moins un nettoyage annuel et des services d'étalonnage, qui sont généralement proposés par le fabricant. En outre, des centres d'étalonnage, tels que les membres du [Centre européen pour l'étalonnage et la caractérisation des aérosols](#) (CEAC), peuvent être disponibles pour effectuer des services spécifiques au CEN/TS.

## La solution TSI® : Compteur de noyaux de condensation Modèle 3750-CEN 7

Le [Compteur de noyaux de condensation \(CNC\) 3750-CEN7](#) est conforme aux exigences spécifiées dans la norme CEN/TS 16976:2016.

Le CNC modèle 3750-CEN7 s'appuie sur l'héritage de plusieurs générations de CNC à butanol de TSI®. Il est conçu pour fonctionner 24 heures sur 24, 7 jours sur 7 et 365 jours par an, il peut stocker des données en interne ou les envoyer à des ordinateurs en réseau, et réagit rapidement aux changements rapides des concentrations d'aérosols.

En raison de son expertise dans l'étalonnage des CNC conformément aux exigences de la norme CEN/TS 16976, TSI® a choisi le Centre mondial d'étalonnage pour la physique des aérosols (WCCAP) situé à l'Institut Leibniz pour la recherche troposphérique (TROPOS) pour effectuer les étalonnages spécifiques à la norme CEN/TS. Chaque nouveau CNC conforme doit passer par ce centre qui est membre du Centre européen pour l'étalonnage et la caractérisation des aérosols ([CEAC](#)). D'autres étalonnages sont disponibles sur demande ou sous forme de contrats de service auprès de TSI.

Entre les étalonnages annuels, les utilisateurs peuvent effectuer une maintenance préventive à titre préventif et/ou selon les besoins. Des conseils à cet égard sont disponibles dans le Guide de maintenance préventive pour le CNC 3750. Ce guide peut être demandé [ici](#).

Le débit à travers le CNC est contrôlé par un orifice critique (voir les points 2-4 de la ligne du [Tableau 9](#), le point 2 de la ligne du [Tableau 10](#) et le point 2 de la ligne du [Tableau 11](#)). Tant que le vide appliqué à l'orifice critique du CNC est suffisamment faible, la dépendance du débit à la pression d'entrée est faible (<5% jusqu'à une pression d'entrée de 70 kPa) et prévisible. Pour plus de détails, se reporter à la note d'application de TSI intitulée « Flow Rate Correction for the Model 3790 Engine Exhaust Condensation Particle Counter (EEPCPC) ». Les principes qui y sont décrits s'appliquent à tous les CNC dont le débit d'entrée est contrôlé par un orifice critique. Le débit du CNC étant contrôlé par un orifice critique tel que décrit ci-dessus, il ne dépend pas de la tension d'alimentation (point 5 du [Tableau 9](#)).

### Changement anticipé au CEN/TS 16976

L'efficacité de la détection dans la révision 2016 de la norme CEN/TS 16976 exige un D50 d'environ 7 nm. En 2016, le CNC 3772 de TSI, couramment utilisé, a été recalibré de 10 nm à 7 nm à cette fin. Le CNC successeur, le modèle 3750, sorti en 2017, a ensuite été conçu avec un D50 de 7 nm. Une future révision de la norme CEN/TS 16976 est prévue pour faire passer ce paramètre à 10 nm. Pour l'avenir, TSI propose à l'achat les numéros de modèle 3750-CEN7 et 3750-CEN10 pour répondre aux besoins actuels et futurs.



Figure 4. Compteur de noyaux de condensation, modèle 3750-CEN7.

## Section 5 : Mesure de la distribution de la taille des particules

Un spectromètre de mobilité électrique (MPSS) mesure la distribution de taille des particules d'aérosol. Pour ce faire, il exécute différentes fonctions complémentaires les unes avec les autres. Bien que toutes ces fonctions soient exécutées simultanément par le système MPSS, elles sont décrites ici dans l'ordre dans lequel une particule individuelle les traverse :

<b>Impaction à l'entrée</b>	À l'entrée de l'instrument, un impacteur élimine les plus grosses particules du flux d'aérosols échantillonnés. Cela permet d'éviter que les plus grosses particules - qui peuvent être hautement chargées - ne dégradent la précision de l'étape de « classification de la mobilité » décrite ci-dessous.
<b>Neutralisation des aérosols</b>	Fournit à l'aérosol entrant une distribution de charge (électrique) connue. Des pourcentages connus de particules auront aucune charge, +1 charge, -1 charge, et ainsi de suite. La distribution des charges varie en fonction de la taille des particules, les plus grosses étant plus à même de porter des charges multiples.
<b>Classification de la mobilité</b>	Cette étape permet de sélectionner la taille des particules en tirant parti de leur comportement dans un champ électrique et de l'état de charge connu conféré par l'étape de « neutralisation ». Cette étape permet de passer d'une taille de particule à l'autre en balayant une gamme de tensions dans un composant spécifique ; l'analyseur de mobilité différentielle (DMA). À tout moment, seules les particules d'une taille spécifique sont sélectionnées pour sortir du DMA.
<b>Comptage des particules</b>	Une fois que les particules ont été sélectionnées par taille et qu'elles sortent du DMA, elles sont comptées par un CNC. Lorsque le DMA émet des particules sélectionnées par taille, le CNC compte ces particules. En combinant ces deux, une distribution de taille peut être construite. La norme CEN/TS 17434:2020 spécifie que le CNC utilisé dans un système MPSS doit être conforme à la norme CEN/TS 16976:2016 ; veuillez consulter la ligne 1 du <a href="#">Tableau 12</a> .

En raison de la nécessité d'exécuter toutes les fonctions ci-dessus (ainsi que le traitement des données nécessaires), les systèmes MPSS sont des instruments complexes. La norme CEN/TS 17434:2020 spécifie les exigences relatives aux systèmes MPSS en ce qui concerne leur conception, leurs performances et leur étalonnage annuel. Les actions de maintenance à effectuer par les utilisateurs sont également spécifiées par le CEN, mais sortent du cadre de ce document. Pour obtenir des conseils sur la maintenance régulière, veuillez vous référer aux ressources TSI® pertinentes (notamment les manuels et les guides de maintenance), et/ou contacter [TSI® Incorporated](#).

## Exigences de conception

Les sections 6.2.6 et 7.1 spécifient les exigences de performance des systèmes MPSS. Dans ce guide de l'acheteur, ces exigences sont divisées en deux parties :

- Le [Tableau 12](#) porte sur les exigences de deux composantes du SSPM (le CNC et le DMA), et
- Le [tableau 13](#) porte sur les autres éléments d'un système MPSS.

Les détails relatifs aux postes spécifiques de ces tableaux se trouvent dans le texte qui suit le tableau en question.

Tableau 12 : Exigences de conception des composants CNC et DMA d'un MPSS.

Poste de travail	Aspects de la conception		Section en 17434	Exigence du CEN
1	CNC	Conformité avec la norme CEN/TS 16976	7.1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le CNC utilisé dans un MPSS doit être conforme à toutes les exigences du CEN/TS 16976.</li> </ul>
2		Caractérisation du CNC	6.2.6	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La courbe d'efficacité de détection de la CNC utilisée dans un SSPM doit être déterminée conformément à la norme CEN/TS 16976.</li> </ul>
3	DMA	Conception générale	7.1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le DMA d'un MPSS doit être cylindrique.</li> <li>• L'écoulement secondaire et l'air excédentaire doivent circuler dans un circuit fermé qui comprend un filtre HEPA et un sécheur.</li> </ul>
4		Mesures de la température et de l'humidité		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Les flux d'aérosols et d'écoulement secondaire dans un MPSS doivent inclure des mesures de température et d'humidité relative.</li> </ul>
5		Exigences en matière d'humidité		<ul style="list-style-type: none"> <li>• L'écoulement secondaire doit avoir une humidité relative &lt;40% à la sortie du DMA.</li> </ul>
6		Mesure de la pression		<ul style="list-style-type: none"> <li>• La pression absolue doit être mesurée soit à l'entrée de l'aérosol, soit dans le flux d'air secondaire.</li> </ul>
7		Résolution de la taille		<ul style="list-style-type: none"> <li>• La résolution idéalisée (théorique) de la taille du DMA devrait être : <math display="block">\frac{\Delta Z_p}{Z_p^*} \leq 0.125 \text{ or } \frac{Q_s}{Q_A} \geq 4</math> </li> </ul>

Tableau 13 : Exigences de conception des autres éléments d'un système MPSS (c'est-à-dire en dehors du CNC et du DMA).

Poste de travail	Aspects de la conception	Section en 17434	Exigence du CEN
1	Pré-séparateur	7.1	<ul style="list-style-type: none"> <li>Un pré-séparateur doit être utilisé si l'aérosol à mesurer comprend une quantité non négligeable de particules plus grosses que celles qui peuvent être mesurées par le spectromètre.</li> <li>Le pré-séparateur peut être un impacteur ou un cyclone, et peut être inclus soit dans l'instrument de granulométrie, soit dans le système d'échantillonnage.</li> </ul>
2	Neutralisateur		<ul style="list-style-type: none"> <li>Un ionisateur radioactif est recommandé ; on peut supposer une distribution de charge bipolaire.</li> <li>Les autres ionisateurs doivent avoir une répartition de la charge semblable à celle d'un ionisateur radioactif.</li> </ul>
3	Alimentation haute tension		<ul style="list-style-type: none"> <li>Il est recommandé que la tension de l'alimentation haute tension puisse être mesurée indépendamment.</li> </ul>
4	Contrôle du temps de délai		<ul style="list-style-type: none"> <li>Un système MPSS doit être capable d'effectuer, au moins à des fins d'étalonnage, un balayage ascendant et descendant à haute résolution.</li> </ul>
5	Déconvolution des données		<ul style="list-style-type: none"> <li>Un système MPSS doit avoir au moins 16 canaux de taille par décade de taille (ordre de grandeur de la taille des particules).</li> <li>Les canaux de taille doivent être géométriquement équidistants.</li> </ul>
6	Temps nécessaire pour mesurer la distribution de la taille du nombre de particules		<ul style="list-style-type: none"> <li>Un système MPSS doit être capable d'effectuer une mesure de la distribution de la taille des particules de deux à dix minutes.</li> </ul>
7	Disponibilité des données		<ul style="list-style-type: none"> <li>Un système MPSS doit être capable de fournir ses données aux niveaux ACTRIS 0, 1 et 2.</li> </ul>
8	Correction de la diffusion dans le logiciel MPSS pour les pertes du système d'échantillonnage	6.2.5	<ul style="list-style-type: none"> <li>Les pertes par diffusion doivent être corrigées de manière adéquate pour garantir l'exactitude et l'harmonisation des données.</li> <li>Une méthode commune utilisant le concept de longueur équivalente est recommandée.</li> <li>Cela peut se faire de deux manières : <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Appliquer une correction pour l'ensemble du système après avoir désactivé toute correction de diffusion effectuée dans le logiciel commercial ; ou,</li> <li>○ Insertion de paramètres spécifiques au site dans le logiciel commercial, si celui-ci le permet.</li> </ul> </li> </ul>

## Exigences de performance

Dans la norme CEN/TS 17434:2020, la section 7.2 spécifie non seulement les résultats que le MPSS doit démontrer lorsqu'il est testé sur les différents aspects de la performance du MPSS, mais aussi *comment* le fabricant doit mener ces tests. Dans ce guide de l'acheteur, cette section est divisée en deux parties :

- Le [tableau 14](#) concerne les mesures du flux d'aérosols et de la concentration en nombre ;
- Le [tableau 15](#) concerne la gamme de tailles et la précision des mesures de la taille des particules et de la distribution de la taille des particules.

Tous les tableaux contiennent des informations sur la manière dont un fabricant doit tester les performances du SSPM à ces égards, ainsi que les critères de performance associés pour le SSPM testé. Les détails relatifs aux lignes spécifiques de ces tableaux se trouvent dans le texte qui suit le tableau en question.

Tableau 14 : Exigences de performance relatives au flux d'aérosols dans le MPSS et à la concentration en nombre de particules mesurée par ce dernier.

Poste de travail	Aspect performance	Section en 17434	Exigence du CEN
1	Débit d'aérosol réel par rapport à l'étalonnage	7.2.1	<ul style="list-style-type: none"> <li>Le débit d'aérosol d'un système MPSS doit être mesuré avec un débitmètre de référence.</li> <li>Le débitmètre de référence doit avoir une incertitude relative de <math>\leq 2\%</math> au débit pertinent.</li> <li>La mesure du débit d'aérosol doit différer du débit d'aérosol nominal de <math>\leq 5\%</math>.</li> </ul>
2	Conditions de flux dans le DMA	7.2.6	<ul style="list-style-type: none"> <li>L'écoulement de l'échantillon à l'intérieur du DMA doit être laminaire.</li> <li>Si l'écoulement est laminaire et qu'un champ électrique n'est pas appliqué, les particules qui entrent dans le DMA ne peuvent pas atteindre la sortie du DMA.</li> <li>Pour cette raison, un test de vérification de zéro peut confirmer la laminarité dans le DMA.</li> <li>On peut conclure que le DMA a un flux laminaire si le CNC mesure <math>&lt; 0,01</math> particule/cm<sup>3</sup> pendant 10 secondes ou plus.</li> </ul>
3	Concentration du bruit de fond	7.2.5	<ul style="list-style-type: none"> <li>La mesure du bruit de fond d'un système MPSS doit être évaluée.</li> <li>Le bruit fond est la concentration en nombre mesurée sur toutes les tranches de taille balayées par le MPSS.</li> <li>Cette concentration numérique doit être <math>&lt; 0,01</math> particules/cm<sup>3</sup> au cours d'une mesure de 10 minutes de l'air ayant traversé un filtre HEPA.</li> </ul>
4	Précision de la concentration intégrée du nombre de particules	7.2.4	<ul style="list-style-type: none"> <li>La concentration en nombre mesurée par le MPSS doit être comparée à un CNC de référence ; cette référence doit être conforme à la norme CEN/TS 16976.</li> <li>La comparaison doit être effectuée en utilisant l'air ambiant.</li> <li>Les données doivent être analysées par régression linéaire.</li> <li>Le résultat de cette analyse doit démontrer que la comparaison MPSS-CNC a : <ul style="list-style-type: none"> <li>Une pente entre 0,9 et 1,1 (forcée par l'origine)</li> <li>Une valeur <math>R^2 \geq 0,9</math></li> </ul> </li> </ul>

La laminarité de l'écoulement de la gaine du DMA est critique comme décrit dans le point 2. L'expérience a montré que l'utilisation de l'air ambiant lorsque de fortes concentrations de particules de  $\sim 10$  nm (ou moins) sont présentes peut produire des résultats de test biaisés pour de nombreux DMA. La meilleure pratique consiste à utiliser des sources d'aérosols contrôlées et/ou bien caractérisées, avec des distributions de taille stables qui ne contiennent pas de fortes concentrations de particules de moins de 10 nm.

Tableau 15 : Exigences de performance relatives à la plage de taille des particules et à la précision des mesures de la taille des particules et de la distribution de la taille des particules effectuées par le MPSS.

Poste de travail	Aspects liés à la performance	Section en 17434	Exigence du CEN
1	Plage de taille des particules	7.2.2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La plage de taille des particules qu'un MPSS particulier est capable de balayer peut être déterminée théoriquement, sur la base des paramètres géométriques et de la plage de haute tension.</li> <li>• Un système MPSS doit être capable de couvrir la plage de 10 à 800 nm de diamètre de mobilité électrique.</li> </ul>
2	Précision de l'étalonnage de la taille des particules	7.2.3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La précision de la taille des particules d'un système MPSS doit être étudiée expérimentalement.</li> <li>• Des particules de sphères de latex de polystyrène (PSL) certifiées monodispersées doivent être utilisées pour cette étude ; il est recommandé d'utiliser des particules PSL d'une taille comprise entre 100 et 300 nm.</li> <li>• La taille de ces particules de LPS, mesurée par le SSPM, doit différer de <math>\leq 3\%</math> de la taille du LPS certifiée par le fabricant.</li> <li>• Si la taille mesurée diffère de la taille certifiée des particules de latex, le débit d'air secondaire MPSS peut être ajusté pour ramener la concordance à 3% près.</li> </ul>
3	Précision de la distribution de la taille du nombre de particules	7.2.7	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La précision des mesures de la distribution granulométrique effectuées par un système MPSS doit être étudiée expérimentalement.</li> <li>• Pour ce faire, les mesures du MPSS sont comparées à celles d'un système MPSS de référence étalonné lorsque les deux systèmes échantillonnent l'aérosol atmosphérique.</li> <li>• Lors de la comparaison des données résultantes, les concentrations de particules mesurées par les deux systèmes sont comparées par tranche de taille. Les critères d'acceptation dépendent de la taille des particules : <ul style="list-style-type: none"> <li>○ <math>\leq 50\%</math> pour les tranches de taille comprises entre 10 nm et 20 nm.</li> <li>○ <math>\leq 10\%</math> pour les tranches de taille comprises entre 20 nm et 200 nm.</li> <li>○ <math>\leq 20\%</math> pour les tranches de taille comprises entre 200 nm et 800 nm.</li> </ul> </li> </ul>

## Exigences d'étalonnage annuel

Tous les systèmes de spectromètre de mobilité électrique (MPSS) utilisés conformément à la CEN/TS 17434:2020 doivent subir un étalonnage annuel. Dans ce guide de l'acheteur, cette obligation est divisée

en deux parties :

- Le [tableau 16](#) porte sur les caractéristiques générales d'un système MPSS ;
- Le [tableau 17](#) concerne les flux au sein d'un système MPSS et la comparaison des mesures d'un système MPSS avec celles d'instruments de référence.

Les détails relatifs aux postes spécifiques de ces tableaux se trouvent dans le texte qui suit le tableau en question.

Tableau 16 : Exigences de l'étalonnage annuel du SSPM qui se rapportent aux caractéristiques générales d'un système SSPM.

Poste de travail	Aspects de l'étalonnage	Section en 17434	Exigence du CEN
1	Fausse vérification de la concentration des antécédents (MPSS)	7.2.5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pendant l'étalonnage du système MPSS, la mesure du bruit de fond de la concentration du système MPSS doit être mesurée.</li> <li>• Cette mesure est effectuée en connectant un filtre HEPA à l'entrée du MPSS et en permettant au MPSS de mesurer la distribution de la taille des particules pendant dix minutes.</li> <li>• La concentration en nombre qui en résulte doit être &lt;0,01 particule/cm<sup>3</sup></li> </ul>
2	Contrôle du bruit de fond moyen de la concentration (CNC)	10.3.7	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Une vérification du bruit de fond de la concentration du CNC ne doit être effectuée que si la mesure du bruit de fond de la concentration du MPSS (ci-dessus) échoue.</li> <li>• Pour réussir, le CNC doit mesurer un taux de comptage moyen de moins de 15 comptages par minute.</li> </ul>
3	Étalonnage des capteurs	10.3.4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lors de l'étalonnage du MPSS, les capteurs qui mesurent l'humidité relative à la fois dans la boucle de l'écoulement secondaire et dans le flux d'aérosol principal doivent être étalonnés afin de garantir que les mesures soient précises à ±3% près.</li> </ul>
4	Calibrage du CNC	10.3.5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Le CNC utilisé dans le MPSS doit être étalonné conformément aux exigences de la norme CEN/TS 16976.</li> </ul>
5	Contrôle du délai de retard	10.3.6	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pour s'assurer que le délai de retard entre le DMA et le CNC est correct, un upscan et un downscan doivent être effectués.</li> <li>• Si les mesures de la distribution granulométrique effectuées pendant le balayage ascendant et descendant sont identiques, le délai de retard est exact.</li> </ul>
6	Précision de l'étalonnage de la taille des particules	7.2.3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pendant l'étalonnage du MPSS, la précision de la taille des particules du système MPSS doit être étudiée expérimentalement.</li> <li>• Cette enquête doit utiliser des particules de sphère en latex de polystyrène (PSL) ; se référer à la norme ISO 15900.</li> <li>• La taille de ces particules de PSL, mesurée par le SSPM, doit différer de ≤3 % de la taille du PSL certifiée par le fabricant.</li> <li>• Si la taille mesurée diffère de la taille certifiée des particules de latex, le débit d'air secondaire du MPSS peut être ajusté pour ramener la concordance à 3% près.</li> </ul>

Tableau 17 : Exigences de l'étalonnage annuel du SSPM qui se rapportent aux flux à l'intérieur d'un système SSPM, et à la comparaison des mesures finales de ce système avec celles des instruments de référence. .

Poste de travail	Aspects de l'étalonnage	Section en 17434	Exigence du CEN
1	Calibrage du débit d'aérosol (MPSS)	10.3.2	<ul style="list-style-type: none"> <li>Le débit d'aérosol d'un système MPSS doit être mesuré pendant l'étalonnage du MPSS.</li> <li>Le débit mesuré ne doit pas différer du débit nominal de 5 % ou plus.</li> </ul>
2	Calibrage du débit d'aérosol (CNC)	10.3.3	<ul style="list-style-type: none"> <li>Le débit d'entrée du CNC qui est utilisé dans un système MPSS doit être mesuré pendant l'étalonnage du MPSS.</li> <li>Le débit d'entrée du CNC et le débit d'entrée du MPSS doivent être identiques l'un à l'autre, dans la plage d'incertitude.</li> </ul>
3	Contrôle de l'état du débit	7.2.6	<ul style="list-style-type: none"> <li>L'écoulement de l'échantillon à l'intérieur du DMA doit être laminaire.</li> <li>Si l'écoulement est laminaire et qu'un champ électrique n'est pas appliqué, les particules entrant dans le DMA ne peuvent pas atteindre la sortie du DMA ; un test de vérification du zéro peut confirmer la laminarité dans le DMA.</li> <li>On peut conclure que le DMA a un flux laminaire si le CNC mesure <math>&lt;0,01</math> particule/cm<sup>3</sup> pendant 10 secondes ou plus.</li> </ul>
4	Contrôle des fuites	10.3.8	<ul style="list-style-type: none"> <li>Le potentiel de fuites dans le SSPM doit être évalué.</li> <li>On peut conclure que le système est exempt de fuites si : <ul style="list-style-type: none"> <li>Le débit d'aérosol (d'entrée) du MPSS et le débit d'entrée du CNC sont égaux, <i>et</i></li> <li>Le contrôle du bruit de fond moyen est réussi.</li> </ul> </li> </ul>
5	Comparaison avec un instrument de référence	7.2.4	<ul style="list-style-type: none"> <li>La concentration en nombre mesurée par le MPSS doit être comparée à un CNC de référence ; cette référence doit être conforme à la norme CEN/TS 16976.</li> <li>La comparaison doit être effectuée en utilisant l'air ambiant.</li> <li>Les données doivent être analysées par régression linéaire.</li> <li>Le résultat de cette analyse doit démontrer que la comparaison MPSS-CNC a : <ul style="list-style-type: none"> <li>Une pente entre 0,9 et 1,1 (passant par l'origine) <ul style="list-style-type: none"> <li>Une valeur <math>R^2 \geq 0,9</math></li> </ul> </li> </ul> </li> </ul>
6	Comparaison avec un SSPM de référence	7.2.7	<ul style="list-style-type: none"> <li>La précision des mesures de la distribution granulométrique effectuées par un système MPSS doit être étudiée expérimentalement.</li> <li>Pour ce faire, les mesures du MPSS sont comparées à celles d'un système MPSS de référence étalonné lorsque les deux systèmes échantillonnent l'aérosol atmosphérique.</li> <li>Lors de l'analyse des données résultantes, les concentrations de particules mesurées par les deux systèmes sont comparées, une taille de particule à la fois. Les critères d'acceptation varient selon la taille des particules : <ul style="list-style-type: none"> <li><math>\leq 50\%</math> pour les tranches de taille comprises entre 10 nm et 20 nm.</li> <li><math>\leq 10\%</math> pour les tranches de taille comprises entre 20 nm et 200 nm.</li> <li><math>\leq 20\%</math> pour les tranches de taille comprises entre 200 nm et 800 nm.</li> </ul> </li> </ul>

En général, un service annuel de nettoyage et d'étalonnage est recommandé pour les systèmes MPSS, et est en fait exigé par la norme CEN/TS 17434:2020 comme détaillé ci-dessus. Ce service est généralement proposé par le fabricant. En outre, des centres d'étalonnage, tels que le Centre mondial d'étalonnage pour la physique des aérosols (WCCAP) à l'Institut Leibniz pour la recherche troposphérique (TROPOS), peuvent être disponibles pour effectuer des services spécifiques CEN/TS.

## La solution TSI® : Spectromètre de mobilité électrique pour la surveillance de l'air ambiant, modèle 3938W50-CEN7.

Alors que spectromètre de granulométrie à mobilité électrique (MPSS) est le terme général utilisé par la CEN/TS 17434 pour décrire ces instruments, l'instrument TSI® doté des mêmes capacités est appelé [Scanning Mobility Particle Sizer™](#) (SMPS™).

Le [modèle SMPS™ 3938W50-CEN7](#) est conforme aux exigences spécifiées dans la norme CEN/TS 17434:2020.

Le modèle SMPS™ 3938W50-CEN7 s'appuie sur l'héritage de plusieurs générations de granulomètres de mobilité de TSI®. Il est capable de balayer de 10 à 800 nm en une seule fois, reprend automatiquement son fonctionnement après une coupure de courant, et fournit des données de mesure dans un format d'exportation complet, qui peut être facilement intégré dans les bases de données de la station de surveillance.

En raison de leur expertise dans l'étalonnage des systèmes SMPS™ conformément aux exigences de la norme CEN/TS 17434, TSI a choisi le Centre mondial d'étalonnage pour la physique des aérosols (WCCAP) situé à l'Institut Leibniz pour la recherche troposphérique (TROPOS) pour effectuer les étalonnages spécifiques à la norme CEN/TS. Chaque nouveau système SMPS™ conforme doit passer par ce membre du Centre européen d'étalonnage et de caractérisation des aérosols ([CEAC](#)). D'autres étalonnages sont disponibles sur demande ou sous forme de contrats de service auprès de TSI.

### Changement anticipé au CEN/TS 16976

Comme décrit à la fin de la [Section 4](#), une future révision de la norme CEN/TS 16976 est prévue pour modifier l'efficacité de comptage du CNC de 7 nm à 10 nm. Étant donné que la norme CEN/TS 17434:2020 exige qu'un système MPSS comprenne un CNC conforme à la norme CEN/TS 16976, la modification de l'exigence D50 pour les CNC affectera également les systèmes MPSS. Pour l'avenir, TSI propose à l'achat les modèles 3938W50-CEN7 et 3938W50-CEN10. Ces modèles comprendront chacun un CNC avec le point de coupure correspondant - en tant que composant des systèmes SMPS™ - pour répondre aux besoins actuels et futurs.



Figure 5. Spectromètre de mobilité électrique Modèle 3938W50-CEN7

## La solution complète de TSI® pour la conformité avec les normes CEN/TS 16976:2016 et 17434:2020

Effectuer des mesures de particules ultrafines en conformité avec les normes CEN nécessite les bons outils. [TSI® offre une solution complète](#) qui comprend l'échantillonnage, le séchage et la dilution de l'aérosol, ainsi que la mesure de l'humidité relative et de la température, de la concentration en nombre de particules et de la distribution de la taille des particules.

Chacun de ces composants a été développé en tenant compte de la conformité CEN et s'appuie sur les décennies d'expérience de TSI en matière de conception, de fabrication et de support des instruments de mesure des particules. La conformité de la solution complète de TSI® aux exigences des normes CEN/TS 16976:2016 et 17434:2020 est résumée dans le [tableau 18](#).

Tableau 18 : Résumé du statut de conformité pour tous les composants de la solution complète de TSI pour la surveillance conformément au CEN des particules ultrafines atmosphériques.

Composant du système		Tableaux	Conformité avec toutes les exigences pertinentes du CEN
Nom	Modèle		
Système d'échantillonnage d'aérosol atmosphérique	3750200	<a href="#">1-3</a>	✓
Dilueur d'aérosol	3333-10	<a href="#">4</a>	✓
Capteur d'humidité relative et de température	RHT3000	<a href="#">5</a>	✓
Compteur de noyaux de condensation (CNC)	3750-CEN7	<a href="#">6-11</a>	✓
Système SMPS™ (Scanning Mobility Particle Sizer)	3938W50-CEN7	<a href="#">12-17</a>	✓

\*Appelé MPSS dans les normes CEN.

Le CNC et le système SMPS™ sont tous deux soumis à des étalonnages spécifiques au CEN/TS au World Calibration Center for Aerosol Physics (WCCAP), situé à l'Institut Leibniz pour la recherche troposphérique (TROPOS). Le WCCAP est membre du Centre européen pour l'étalonnage et la caractérisation des aérosols ([ECAC](#)), et est une installation d'étalonnage ACTRIS. De la conception à l'étalonnage, la solution de surveillance des particules ultrafines de TSI est entièrement conforme aux normes CEN.

### Accessoires supplémentaires

Une pompe est nécessaire pour entraîner les flux du système, et un filtre catalytique de vapeur en option élimine la vapeur de butanol de l'échappement du système CNC et SMPS™. Ces accessoires n'ont pas d'exigences définies pour eux par les normes CEN/TS. Veuillez vous référer à la brochure des solutions ([US](#) et [A4](#)) pour plus d'informations sur ces accessoires.



Figure 6. La solution de surveillance des particules ultrafines de TSI. Cette solution est conforme aux normes CEN 16976 et 17434, comme le résume le [tableau 18](#). Dilueur (en option) et pompe non représentés.

Pour plus d'informations sur l'un des composants, veuillez consulter la brochure de la solution, ainsi que les fiches techniques de tous les composants du système. N'hésitez pas à contacter TSI® à tout moment pour toute question ou pour obtenir de l'aide afin de configurer une solution de surveillance des particules ultrafines adaptée à vos besoins spécifiques.

---

## Références

1. CEN/TS 16976:2016. [Air ambiant - Détermination de la concentration en nombre de particules de l'aérosol atmosphérique.](#)
2. CEN/TS 17434:2020. [Air ambiant - Détermination des spectres granulométriques des aérosols atmosphériques à l'aide d'un spectromètre de taille des particules à mobilité \(MPSS\).](#)
3. Brochure sur les solutions [US](#) et [A4](#).
4. Système d'échantillonnage de l'aérosol atmosphérique 3750200, fiche de spécifications, [US](#) et [A4](#).
5. Fiche de spécifications du Dilueur d'aérosol 3333-10, [US](#) et [A4](#).
6. Fiche de spécifications du Capteur d'humidité et de température pour aérosols RHT3000, [US](#) et [A4](#).
7. Feuille de spécifications du CNC 3750-CEN, [US](#) et [A4](#).
8. Feuille de spécifications SMPS 3938W50-CEN, [US](#) et [A4](#).
9. "Flow Rate Correction of the Model 3790 Engine Exhaust Condensation Particle Counter (EECPC)", Note d'application EECPC-001, [US](#) et [A4](#).



UNDERSTANDING, ACCELERATED

**TSI Incorporated** - Visitez notre site web [www.tsi.com](http://www.tsi.com) pour plus d'informations.

<b>USATel</b>	: +1 800 680-1220	<b>IndeTel</b>	: +91 80 67877200
<b>UKTel</b>	: +44 149 4 459200	<b>ChineTel</b>	: +86 10 8219 7688
<b>FranceTel</b>	: +33 1 41 19 21 99	<b>SingapourTéléphone</b>	: +65 6595 6388
<b>AllemagneTel</b>	: +49 241 523030		

P/N 5002776 Rev. A-(FR) ©2021 TSI Incorporated Imprimé aux États-Unis.

