

JUMO



Guide de la mesure de conductivité



Reinhard Manns

Guide de la mesure de conductivité

Reinhard Manns

Remarque :
cette brochure a été écrite en notre âme et conscience. Nous n'assumons pas la responsabilité d'éventuelles erreurs. Dans tous les cas, les notices de mise en service des appareils concernés prévalent.

Avant-propos

La mesure de conductivité est un procédé simple à mettre en œuvre pour déterminer et surveiller la concentration totale en sels dans les eaux. On la rencontre dans de nombreux domaines d'analyses industrielles et de l'environnement. Qu'il s'agisse du nettoyage des conduites de remplissage dans une laiterie ou de la protection du système de refroidissement dans une usine de production d'énergie, les opérations correctes dépendent toujours de la valeur de la conductivité.

Ce guide présente les notions électrochimiques sous-jacentes et les applications typiques, dans une forme généralement compréhensible. Elle apporte en plus des indications sur l'état de l'art des convertisseurs de mesures, régulateurs et capteurs pour la mesure de cette grandeur.

Nous maintenons ce « Guide de la mesure de conductivité » constamment à jour et appelons nos lecteurs à contribuer à un échange d'expérience et de connaissances. Nous accueillerons volontiers toute réaction ou contribution à la discussion.

Fulda, avril 2007

Reinhard Manns
Ingenieur dipl. (FH)



JUMO Régulation SAS

Actipôle Borny
7 rue des Drapiers
B.P. 45200
57075 Metz - Cedex 3, France
Tél. : +33 3 87 37 53 00
Fax : +33 3 87 37 89 00
E-Mail : info@jumo.net
Internet : www.jumo.fr

JUMO

Mess- und Regeltechnik AG

Laubisrütistrasse 70
8712 Stäfa, Suisse
Tél. : +41 44 928 24 44
Fax : +41 44 928 24 48
E-Mail : info@jumo.ch
Internet : www.jumo.ch

JUMO AUTOMATION

S.P.R.L. / P.G.M.B.H. / B.V.B.A

Industriestraße 18
4700 Eupen, Belgique
Tél. : +32 87 59 53 00
Fax : +32 87 74 02 03
E-Mail : info@jumo.be
Internet : www.jumo.be

Reproduction autorisée avec mention de la source!

Numéro d'article : 00411340

Numéro de livre : FAS 624

Date d'impression : 04.07

1	Bases	7
1.1	Généralités	7
1.2	Méthodes de mesure de la conductivité	8
1.2.1	Généralités	8
1.2.2	Constante de cellule	9
1.2.3	Tension alternative	10
1.2.4	Principes de mesure	10
1.2.5	Cellule de mesure à induction	12
2	Technique de mesure	13
2.1	Construction d'un dispositif de process	13
2.1.1	Cellule de mesure	13
2.1.2	Armatures	14
2.1.3	Convertisseur de mesure/régulateur	14
2.1.4	Matériau des câbles de raccordement et autres	15
2.2	Mise en service du dispositif de mesure	15
2.2.1	Point de mesure	15
2.2.2	Calibrage/réglage	15
2.2.3	Conditions de mesure	17
2.2.4	Solutions de référence	20
3	Assurance-qualité	21
3.1	Documentation	21
3.2	Entretien	23
3.3	Problèmes/Mesures	25
3.4	Nettoyage	25
3.5	Possibilités de test sur le terrain	26
3.6	Stockage de la cellule de mesure	26
4	Applications	27
4.1	Stations d'épuration d'eaux usées	27
4.2	Galvanisation	28
4.3	Installations de remplissage de boissons	28
4.4	Usines de production d'énergie	29
4.5	Pharmacie	31
4.6	Stations de déminéralisation totale	32
4.7	Mesure de la concentration	33

Sommaire

5	Aspects juridiques	35
6	Sources	37
7	Annexe	39
7.1	Exemple de rapport d'essai d'une cellule de mesure	39
7.2	Exemple de certificat de calibrage d'un convertisseur de mesure	40

1.1 Généralités

La conductivité¹ (γ)² exprime la propriété d'un matériau de conduire le courant électrique. Dans les cas des métaux, c'est le mouvement des électrons qui assure le passage du courant. Dans les solutions aqueuses, ce sont les ions qui effectuent le transport des charges. Les ions résultent de la dissolution de sels, acides et bases. Plus le liquide contient d'ions, mieux il conduit le courant.

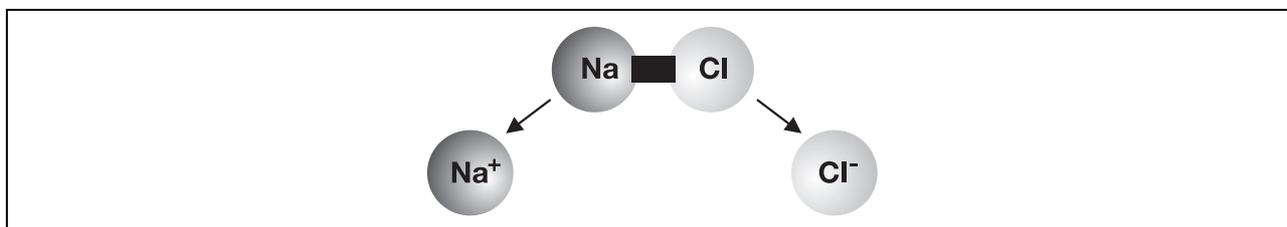


Figure 1 : les sels se décomposent en ions chargés positivement et négativement.

Cette relation entre la concentration en ions et la capacité de conduire le courant électrique fait de la conductivité une grandeur intéressante à mesurer dans l'analyse de l'eau. Elle convient très bien pour déterminer la concentration en sels dissous.

Le résultat de la mesure de conductivité ne s'exprime pas en mg/l, ni en pourcentage, mais en S/m (siemens par mètre). En pratique, les unités usitées sont les sous-multiples $\mu\text{S/cm}$ et mS/cm .

	S/m	S/cm	mS/cm	$\mu\text{S/cm}$
S/m	1	0,01	10	10.000
S/cm	100	1	1.000	1.000.000
mS/cm	0,1	0,001	1	1.000
$\mu\text{S/cm}$	0,000 1	0,000 001	0,001	1

Tableau 1 : conversion des unités de conductivité.

Le tableau suivant rappelle la relation entre concentration de sel et conductivité.

Eau ou solution aqueuse	Plage de conductivité à 25°C	Concentration en sel
Eau ultra-pure	0,055 $\mu\text{S/cm}$	0 mg/l
Eau déminéralisée	0,055 à 2 $\mu\text{S/cm}$	0 à 1 mg/l
Eau de pluie	10 à 50 $\mu\text{S/cm}$	5 à 20 mg/l
Eaux souterraines, eaux de ruissellement et eau potable	50 à 1000 $\mu\text{S/cm}$	20 à 50 mg/l
Eau de mer	20 à 60 mS/cm	10 à 40 g/l
Solution de sel de cuisine	77 à 250 mS/cm	50 à 250 g/l

Tableau 2 : exemples de valeurs de conductivité.

¹ Il s'agit précisément de la conductivité électrique spécifique.

² Le symbole de la conductivité électrique a été κ (kappa) ou χ (khi). Depuis 1993, la norme européenne EN 27 888 impose γ (gamma).

1 Bases

1.2 Méthodes de mesure de la conductivité

1.2.1 Généralités

Le principe de base de la mesure de conductivité est le même dans toutes les méthodes : l'appareil de mesure applique une tension électrique à la solution à mesurer. Un courant électrique circule en fonction de la conductivité. Suivant la méthode ou l'application, l'appareil de mesure impose une tension constante et enregistre la variation du courant électrique, ou bien l'appareil de mesure impose un courant constant et évalue la variation de tension.

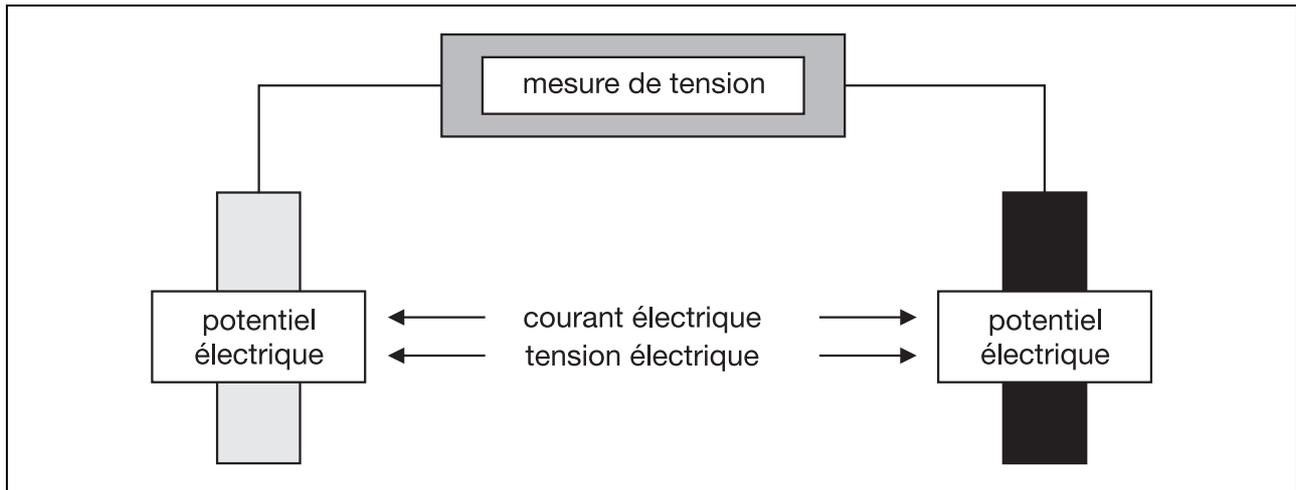


Figure 2 : schéma d'une cellule de mesure de conductivité.

Les deux principes s'appuient sur la loi d'ohm.

$$R = \frac{U}{I} = \frac{1}{G} \quad (1)$$

R : résistance électrique
I : intensité du courant électrique
U : tension électrique ou conversion pour la conductivité
G : Conductance

$$\gamma = \frac{I}{U} \cdot k' \quad (2)$$

γ : conductivité électrique (spécifique)
I : intensité du courant électrique
U : tension électrique
 k' : constante de cellule

À tension constante, le courant augmente proportionnellement à la conductivité. À courant constant, la tension diminue quand la conductivité augmente. Comme le montre la loi d'Ohm, la mesure de conductivité est en fait une mesure de résistance. La valeur inverse I/U donne la conductivité à partir de la résistance.

1.2.2 Constante de cellule

La conductivité, comme la résistance, dépend des dimensions physiques des conducteurs électriques. La longueur et la section du conducteur déterminent la constante de cellule.

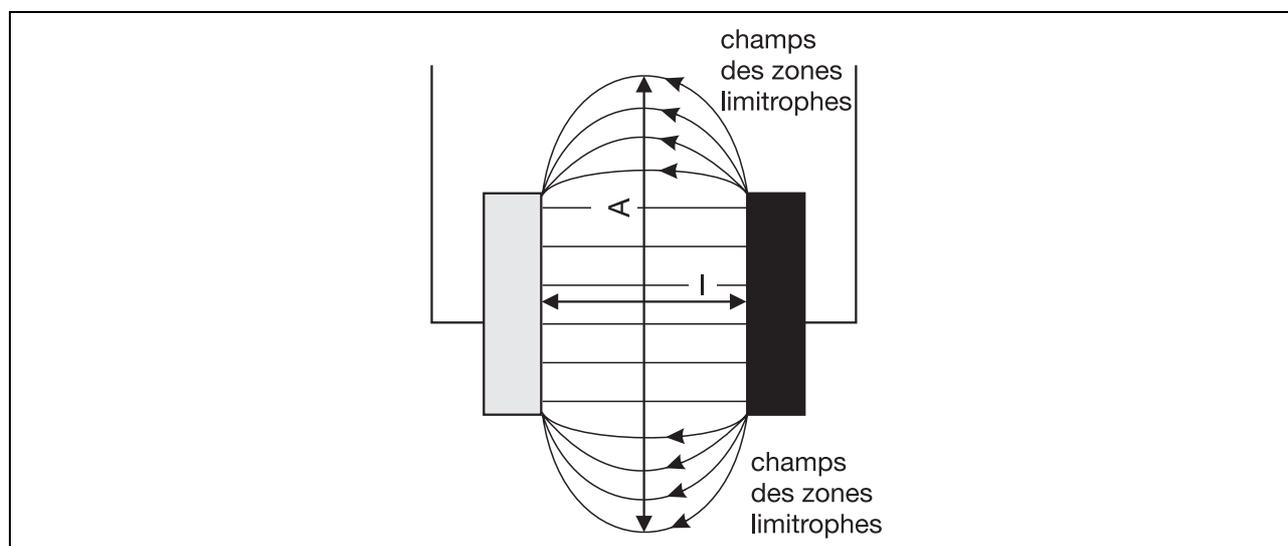


Figure 3 : représentation schématique de la surface active.

Avec une faible longueur de conducteur, les électrodes sont proches l'une de l'autre. Plus la distance entre les électrodes est faible, plus faible est la résistance de la solution soumise à la mesure. L'effet des électrodes sur les ions augmente.

Une grande section de conducteur équivaut à une grande surface des électrodes. Plus la surface des électrodes est grande, plus faible est la résistance de la solution soumise à la mesure. Plus la surface augmente, plus nombreux sont les ions qui se trouvent dans la zone d'influence des électrodes.

La section du conducteur électrique est en règle générale supérieure à la surface des électrodes. Les électrodes n'agissent pas seulement sur les ions qui se trouvent directement entre les électrodes, mais aussi sur ceux des zones limitrophes. L'effet du champ des électrodes sur les ions diminue avec la distance. Les champs limitrophes peuvent être délimités par la conception de la cellule ou l'endroit où elle est installée, par exemple les parois d'un tube.

Ces effets sont pris en compte dans la constante de cellule.

$$k' = \frac{l}{A} \quad (3)$$

k' : constante de cellule

l : longueur du conducteur

A : section du conducteur

Il s'agit donc pour la conductivité électrique (spécifique) g d'une grandeur spécifique à la matière qui contrairement à la conductance γ ne dépend pas des facteurs géométriques. La valeur exacte de la constante de cellule est obtenue par calibrage avec une solution de référence dont la conductivité dépendante de la température est connue.

1 Bases

1.2.3 Tension alternative

Le courant électrique entre les électrodes dépend du mouvement des ions à travers la solution à mesurer. Les ions se déplacent pendant la mesure vers l'électrode de charge opposée. Chaque ion qui appartient à une surface d'électrode équilibre une partie de la tension entre les électrodes. Comme il n'est plus en mouvement, il bloque le courant électrique. Cet effet (polarisation) peut être combattu par une tension alternative. Grâce à l'inversion constante de la polarité, seule une faible quantité d'ions atteint les électrodes, et encore pendant une courte durée. Plus la solution est riche en ions, plus grande est la conductivité, plus la fréquence fournie par l'appareil de mesure devra être élevée pour prévenir la polarisation.

Les appareils de mesure modernes (par ex. JUMO dTRANS Lf 01) adaptent la fréquence de la tension à la plage de mesure, de façon à obtenir des résultats optimaux.

1.2.4 Principes de mesure

- Principe par conduction
 - cellules de mesure à deux électrodes
 - cellules de mesure à quatre électrodes
- Principe par induction

Cellules à deux électrodes

La cellule à deux électrodes est la forme la plus simple des cellules de mesure de la conductivité. Elle est parfaitement suffisante pour les mesures industrielles générales. Cette cellule est constituée de deux électrodes et d'un plongeur qui les réunit. Les deux électrodes sont soumises à une tension alternative constante. Le signal de mesure est le courant qui circule à travers la solution à mesurer.

Ces cellules se distinguent suivant les applications par la constante de cellule et la nature des électrodes.

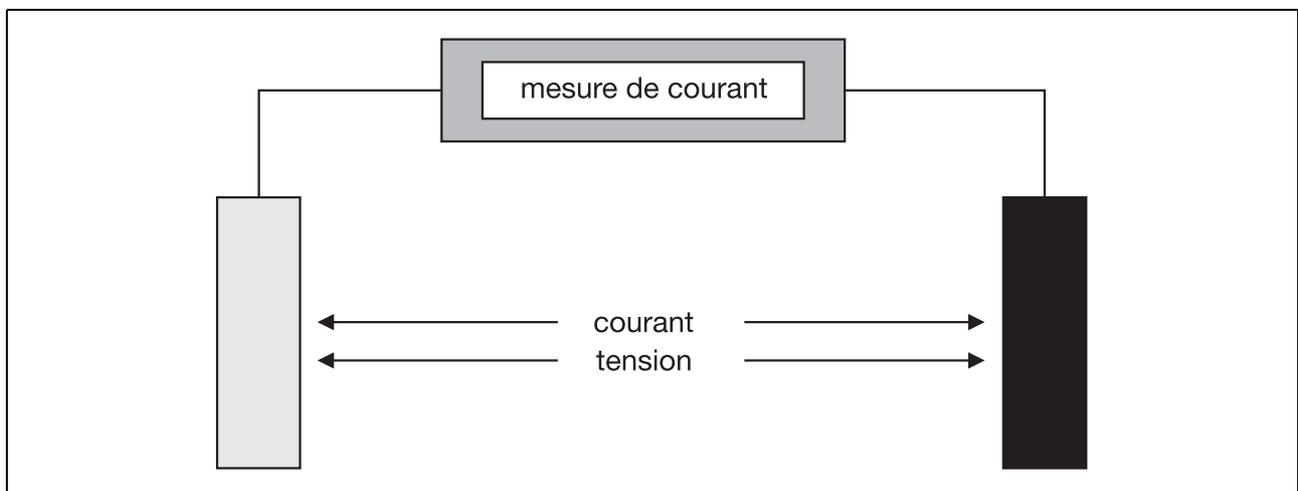


Figure 4 : schéma d'une cellule à deux électrodes.

Une saleté sur l'électrode, en réduisant la surface de l'électrode génère une plus petite valeur de mesure. Pour les faibles valeurs de conductivité, cet effet est souhaitable. Pour les valeurs de mesure plus fortes, la capacité d'enregistrement de l'appareil de mesure peut primer. Cela fait de la constante de cellule optimale une question de plage de mesure.

Exemple d'application	Plage de conductivité	Constante de cellule
Distillat, condensat, eau ultra-pure, eau déminéralisée	$\gamma < 10 \mu\text{S/cm}$	$k' \leq 0,1 \text{cm}^{-1}$
Eaux souterraines, eaux de ruissellement et eau potable	$\gamma < 10 \dots 10.000 \mu\text{S/cm}$	$k' \leq 1 \text{cm}^{-1}$
Eau de mer, solutions salines	$\gamma > 10 \text{mS/cm}$	$k' \leq 10 \text{cm}^{-1}$

Tableau 3 : constante de cellule pour différentes plages de conductivité avec exemple d'application.

Avec les cellules de mesure de constante $k' \leq 0,1 \text{cm}^{-1}$, la surface des électrodes est lisse, de façon à améliorer le calibrage pour les faibles conductivités.

Les cellules de mesure de constante $k' > 0,1$ ont des électrodes à surface rugueuse, de façon à réduire la tendance à polariser pour les fortes valeurs de conductivité.

Cellules à quatre électrodes

Ces cellules de mesure comportent deux paires d'électrodes. L'une mesure le courant qui traverse la solution, l'autre mesure la tension dans la solution.

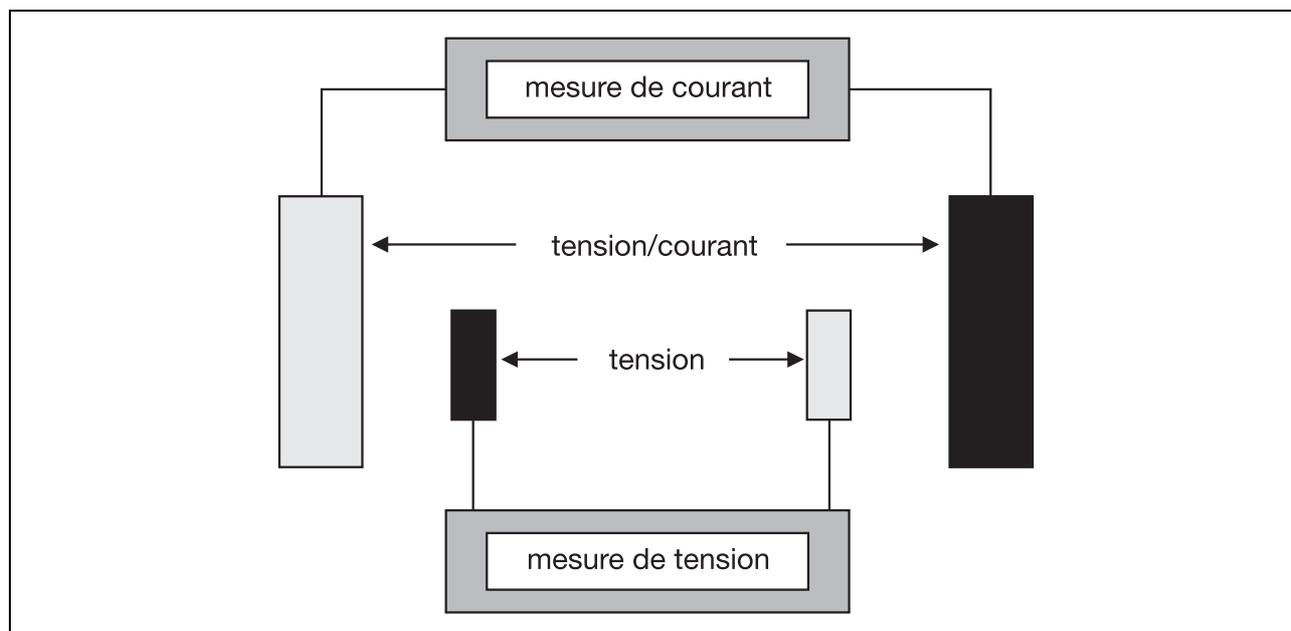


Figure 5 : schéma d'une cellule de mesure à quatre électrodes.

L'avantage de la cellule de mesure à quatre électrodes est son insensibilité aux résistances parasites, telles que celles de longs câbles de raccordement, salissures ou polarisation. Ces effets donnent des résultats sous-évalués car ils réduisent la tension appliquée par les électrodes à la solution à mesurer. La deuxième paire d'électrodes détecte la tension dans la solution à mesurer. L'appareil de mesure peut prendre en compte une résistance parasite par une adaptation électronique basée sur les rapports mesurés entre les tensions et courants des deux paires d'électrodes.

Le conductimètre calcule la conductivité grâce à l'équation déjà exposée :

$$\gamma = \frac{I}{U} \cdot k' \quad (2)$$

1 Bases

Une résistance supplémentaire, comme une couche de crasse, atténue le courant et la tension dans la même proportion. Comme l'appareil de mesure évalue les deux grandeurs, il est à même de calculer la conductivité dans la limite de ses caractéristiques propres.

Les cellules à quatre électrodes sont utilisées de préférence dans les appareils de laboratoire de grande précision.

1.2.5 Cellule de mesure à induction

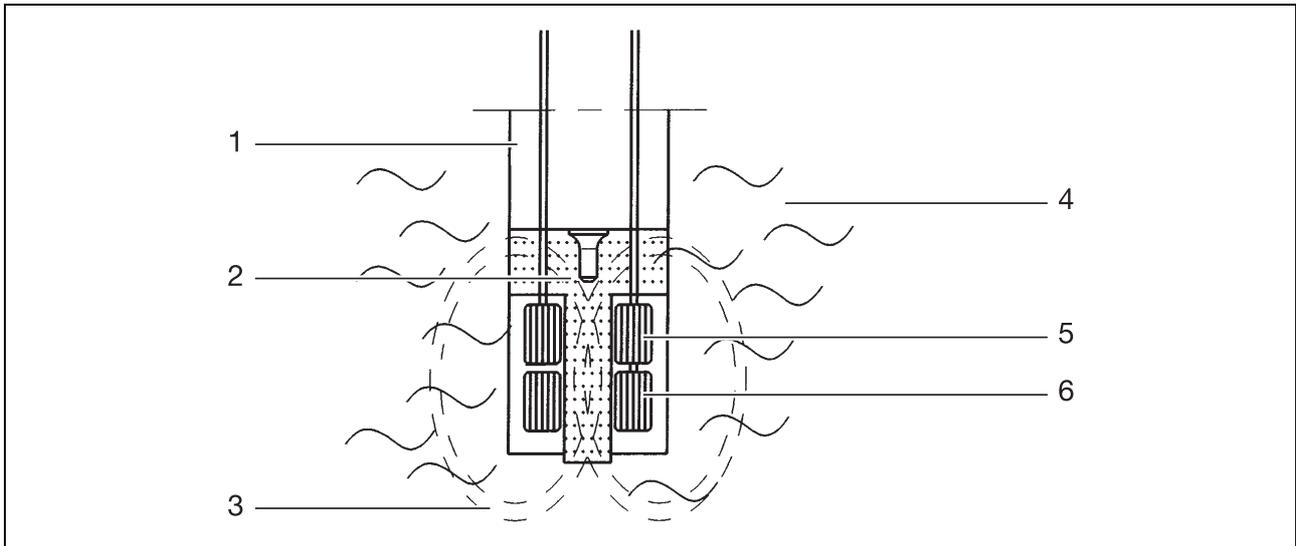


Figure 6 : schéma d'une cellule de mesure à induction.

- | | | | |
|---|---|---|---------------------|
| 1 | corps PVDF ou PEEK | 4 | solution à mesurer |
| 2 | canal de circulation en T | 5 | bobine réceptrice |
| 3 | boucle de liquide produite par le courant de mesure | 6 | bobine d'excitation |

Dans ces cellules, les électrodes sont remplacées par deux bobines. L'une des bobines sert à l'excitation. Elle est parcourue par un courant alternatif qui produit un champ magnétique dans son environnement. La solution à mesurer se trouve dans le noyau de la bobine. Le champ magnétique de la bobine induit dans la solution à mesurer le courant électrique nécessaire à la mesure.

Le courant qui traverse la solution produit de son côté un champ magnétique. Ce champ magnétique induit à son tour dans la deuxième bobine (réceptrice) un courant alternatif et la tension alternative qui l'accompagne.

La tension de la bobine réceptrice dépend directement du courant qui circule dans la solution à mesurer, donc de la conductivité.

Comme un champ magnétique agit aussi bien à travers un tube de plastique ou de téflon, tout contact direct avec la solution à mesurer est inutile. Les avantages de cette technique de mesure sans contact sont évidents. La mesure dans les milieux agressifs, comme les acides et les bases, est possible sans problème. Les fortes conductivités ne peuvent pas provoquer d'effets de polarisation, donc pas de résultats sous-évalués.

Le conductimètre optimal dépend des applications. Au laboratoire, on trouve des appareils de table, sur le terrain des appareils portatifs et pour les mesures en continu dans les process des convertisseurs de mesure.

Dans toutes les applications pour lesquelles il faut une image complète de la teneur en sels d'une eau, il n'y a pas d'autre choix qu'une mesure en continu.

2.1 Construction d'un dispositif de process

La notion de dispositif de mesure comprend la totalité de l'équipement utilisé pour la mesure de conductivité, à savoir :

- Capteur de conductivité (cellule de mesure)
- Armature à immerger ou de passage
- Convertisseur de mesure (appareil de mesure)
- Câble de raccordement

2.1.1 Cellule de mesure

Les cellules à deux et quatre électrodes sont constituées d'un plongeur et des électrodes. L'important pour l'application tient dans la constante de cellule et dans la surface des électrodes.

Conductivité :

$\gamma \leq 10 \mu\text{S/cm}$:	cellule à 2 électrodes $k \leq 0,1/\text{cm}$, électrodes à surface lisse
$\gamma > 10 \mu\text{S/cm}$ à $\leq 10 \text{mS/cm}$:	cellule à induction, à 2 ou 4 électrodes $k \leq 1/\text{cm}$, électrodes à surface rugueuse
$\gamma > 10 \text{mS/cm}$:	cellule inductive ou à 4 électrodes $k \geq 1/\text{cm}$, électrodes à surface rugueuse



Figure 7 : cellule à deux électrodes avec constante $k = 0,01$ (en haut) et $k = 0,1$ (en bas).

2 Technique de mesure

2.1.2 Armatures

Les armatures servent à fixer et protéger les cellules de mesure. Les armatures à immerger permettent la mesure non seulement à la surface du liquide, mais aussi en profondeur. Divers éléments de fixation et accessoires permettent le montage sur presque tous les supports. Habituellement, les armatures à immerger sont faites de polypropylène (PP) et produites en longueurs jusqu'à 2000 mm. Il existe d'autres matériaux (par ex. V4A) pour des applications spéciales. Les armatures de passage permettent la mesure directe dans des conduites ou dans des dérivations de ces conduites.

Toutes les armatures doivent être accessibles pour permettre l'entretien et le test réguliers des capteurs. Le remplacement du capteur devra être réalisable à tout moment sans gros efforts.

Lors du montage du capteur, il faut veiller à ne pas perturber le champ limitrophe (voir section 1.2.2 „Constante de cellule“). C'est-à-dire qu'un espace minimal doit toujours être ménagé entre le capteur et les surfaces limites (paroi de tube, de réservoir, entre autres).

2.1.3 Convertisseur de mesure/régulateur

Le convertisseur de mesure a pour fonction de traiter le signal de la cellule de mesure. Cela consiste à le convertir en un signal normalisé (par ex. dans une boucle de courant $I = 4$ à 20mA) transmis directement à un automate (API) ou à une unité de dosage. C'est là que s'effectuent l'affichage et la régulation de la conductivité. Si un affichage local est nécessaire, on utilise des instruments de tableau adéquats. Pour le montage sur le terrain, il existe des coffrets de terrain ou des appareils spéciaux en coffret de terrain. La plupart des appareils disponibles aujourd'hui sont des appareils à microprocesseur, adaptables individuellement à chaque cas de mesure. Cette adaptation comporte d'une part le calibrage de la constante de cellule, d'autre part le calibrage du coefficient de température (voir section 2.2.2 „Calibrage/réglage“).

Pour la régulation de la conductivité, on utilise principalement des régulateurs par valeur limite.



Figure 8 : JUMO dTRANS Lf 01 (convertisseur de mesure/régulateur pour cellule à deux électrodes).



Figure 9 : JUMO AQUIS 500 CR (convertisseur de mesure/régulateur pour cellule de mesure à deux et quatre électrodes).



Figure 10 : JUMO CTI-750 (dispositif de mesure de conductivité par induction).

2.1.4 Matériau des câbles de raccordement et autres

Grâce à la technique précise des convertisseurs de mesure actuels, il ne reste que quelques points à prendre en compte pour le choix du matériau des câbles, comme par exemple :

- Le matériau des câbles doit être blindé.
- Le cheminement des câbles doit toujours être direct, c'est-à-dire qu'il doit éviter les boîtes à bornes, les câbles rallonges et les connecteurs intermédiaires.
- Les câbles ne doivent pas courir parallèlement à des chemins de câbles de forte puissance !

Câble de raccordement recommandé :
par ex. JUMO type 2990-9 (longueur) - 0

2.2 Mise en service du dispositif de mesure

2.2.1 Point de mesure

Après le choix de l'installation de mesure optimale, on passe à la mise en service. Elle ne se limite pas au montage du matériel, mais comporte aussi le choix du point de mesure adéquat. Le dispositif de mesure affiche toujours la conductivité qui règne à l'endroit de la mesure. Les éléments du choix du point de mesure peuvent se trouver par exemple dans les normes et règlements propres à l'application.

2.2.2 Calibrage/réglage

Pour l'installation, il suffit de régler la constante de cellule à la valeur indiquée dans la notice de la cellule de mesure. Il existe des résistances de test pour vérifier le fonctionnement correct du convertisseur de mesure. Ces résistances simulent une valeur de conductivité définie. Pendant le test, le coefficient de température doit être réglé à 0%/K !

2 Technique de mesure

Calibrage de la constante de cellule

Les conditions de production font que la constante des cellules usuelles peut accuser une dispersion de $\pm 10\%$. Cela peut paraître très imprécis à première vue, mais un coefficient de température mal réglé peut provoquer des erreurs de mesure bien plus grandes.

Dans le cas normal, c'est-à-dire celui de la mesure d'une forte conductivité, l'imprécision de la cellule de mesure est négligeable en pratique. Dans le cas de grandes exigences de précision, on peut accorder les uns aux autres la cellule de mesure, le câble de mesure et le convertisseur de mesure. C'est l'affaire de l'installateur lors de la mise en service ou du technicien lors d'un entretien. Les convertisseurs de mesure modernes (par ex. le JUMO dTRANS Lf 01) offrent des possibilités étendues à cet effet (comme la détermination automatique de la constante de cellule, le calibrage avec des solutions de référence etc.). Les intervalles entre deux calibrages dépendent du domaine d'application des cellules de mesure.

Coefficient de température (α)

La conductivité d'une solution dépend de la température ; c'est pourquoi une mesure correcte suppose la connaissance tant de la température que du coefficient de température de la solution à mesurer. La température peut être mesurée automatiquement avec un capteur (par ex. Pt 100 ou Pt 1000), ou bien réglée manuellement par l'utilisateur. Le coefficient de température peut être calculé automatiquement par le convertisseur de mesure ou réglé manuellement. Ici aussi le JUMO dTRANS Lf 01 propose les routines de calibrage *ad hoc*.

T [°C]	Tk [%/K]					
	0,00	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50
0	0,0	-12,5	-25,0	-37,5	-50,0	-62,5
10	0,0	-7,5	-15,0	-22,5	-30,0	-37,5
20	0,0	-2,5	-5,0	-7,5	-10,0	-12,5
25	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
30	0,0	2,5	5,0	7,5	10,0	12,5
40	0,0	7,5	15,0	22,5	30,0	37,5
50	0,0	12,5	25,0	37,5	50,0	62,5
60	0,0	17,5	35,0	52,5	70,0	87,5
70	0,0	22,5	45,0	67,5	90,0	112,5
75	0,0	25,0	50,0	75,0	100,0	125,0
80	0,0	27,5	55,0	82,5	110,0	137,5
90	0,0	32,5	65,5	97,5	130,0	162,5
100	0,0	37,5	75,0	112,5	150,0	187,5

Tableau 4 : variation de la conductivité en % en fonction de la température réelle [°C] et du coefficient de température réel [%/K], Température de référence 25°C.

Exemple

À une température réelle de 75°C et avec un coefficient de température réel de 2%/K la conductivité varie de 100% ; cela signifie qu'elle double !

Conséquence

Un appareil sans compensation de la température affiche le double de la valeur affichée par un appareil avec une compensation en température correcte.

2.2.3 Conditions de mesure

Une mesure correcte suppose la connaissance de quelques grandeurs importantes qui influent sur la conductivité.

Température/coefficient de température/température de référence

La conductivité dépend non seulement de la concentration en sels mais aussi de la température. Comme nous ne nous intéressons qu'à la concentration en sels, l'appareil doit compenser l'effet de la température. Il convertit la valeur de conductivité mesurée en une valeur ramenée à la température de référence. C'est-à-dire que l'appareil de mesure n'affiche pas la valeur de la conductivité réelle de la solution, mais la valeur que la solution aurait à la température de référence. Si la température de la solution mesurée varie, la valeur affichée reste inchangée.

T [°C]	Tk [%/K]						
	0,00	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00
0	-50,0	-37,5	-25,0	-12,5	0,0	12,5	25,0
10	-30,0	-22,5	-15,0	-7,5	0,0	7,5	15,0
20	-10,0	-7,5	-5,0	-2,5	0,0	2,5	5,0
25	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
30	10,0	7,5	5,0	2,5	0,0	-2,5	-5,0
40	30,0	22,5	15,0	7,5	0,0	-7,5	-15,0
50	50,0	37,5	25,0	12,5	0,0	-12,5	-25,0
60	70,0	52,5	35,0	17,5	0,0	-17,5	-35,0
70	90,0	67,5	45,0	22,5	0,0	-22,5	-45,0
75	100,0	75,0	50,0	25,0	0,0	-25,0	-50,0
80	110,0	82,5	55,0	27,5	0,0	-27,5	-55,0
90	130,0	97,5	65,0	32,5	0,0	-32,5	-65,0
100	150,0	112,5	75,0	37,5	0,0	-37,5	-75,0

Tableau 5 : erreur d'affichage en % avec un coefficient de température mal réglé, coefficient de température de la solution à mesurer 2,0%/K, Température de référence 25°C.

Exemple

À une température réelle de 75°C et avec un appareil réglé pour un coefficient de température de 1%/K, la valeur affichée est de 50 % plus élevée que la valeur réelle.

La **température de référence** est fixée, suivant l'application, soit à 25°C soit à 20°C. La valeur de conductivité rapportée à T = 20°C est toujours inférieure à la valeur rapportée à T = 25°C. Pour l'eau potable (coefficient de température α env. 2,1 %/K) la différence entre les valeurs affichées est de 10,5a %.

2 Technique de mesure

T [°C]	Tk [%/K]						
	0,00	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00
0	50	40	30	20	10	0	-10
10	30	25	20	15	10	5	0
20	10	10	10	10	10	10	10
25	0	2,5	5	7,5	10	12,5	15
30	-10	-5	0	5	10	15	20
40	-30	-20	-10	0	10	20	30
50	-50	-35	-20	-5	10	25	40
60	-70	-50	-30	-10	10	30	50
70	-90	-65	-40	-15	10	35	60
75	-100	-72,5	-45	-17,5	10	37,5	65
80	-110	-80	-50	-20	10	40	70
90	-130	-95	-60	-25	10	45	80
100	-150	-110	-70	-30	10	50	90

Tableau 6 : différences d'affichage en % pour diverses températures de référence, sur l'appareil de travail et sur l'appareil de référence, et pour différents réglages du coefficient de température sur l'appareil de référence, coefficient de température de l'appareil de travail 2,0%/K, température de référence sur l'appareil de travail 25°C, température de référence sur l'appareil de référence 20°C.

Exemple

À une température réelle de 40°C, avec un appareil de référence réglé pour un coefficient de température de 2,5%/K, l'appareil de travail indique 20% de plus que l'appareil de référence.

Chaque solution à mesurer montre un comportement propre en fonction de la température. Dans les eaux souterraines, les eaux de ruissellement, l'eau potable et les eaux usées municipales, la conductivité rapportée à T = 25°C augmente de 2,1%/K.

La compensation en température, le calcul de la valeur rapportée à la température de référence, est effectuée par une fonction mathématique de l'appareil de mesure. Le coefficient de température de la solution à mesurer caractérise le comportement en fonction de la température de la solution à mesurer ; il doit être réglé en conséquence.

Solution à mesurer	Coefficient de température	Plage de température
Chlorure de potassium $C_{(KCl)} = 0,01 \text{ mol/l}$	$\alpha (25^\circ\text{C}) = 1,9\%/K$	$\vartheta = 18 \text{ à } 25^\circ\text{C}$
Acide phosphorique $C_{(H_3PO_4)} = 0,01 \text{ mol/l}$	$\alpha (25^\circ\text{C}) = 0,9\%/K$	$\vartheta = 18 \text{ à } 25^\circ\text{C}$
Acide chlorhydrique $C_{(HCl)} = 0,01 \text{ mol/l}$	$\alpha (25^\circ\text{C}) = 1,4\%/K$	$\vartheta = 18 \text{ à } 25^\circ\text{C}$

Tableau 7 : exemples de coefficients de température.

La validité du coefficient de température se vérifie simplement :

- Tempérer la solution à mesurer à la température de référence ($\pm 1 \text{ K}$).
- Mesurer et noter la conductivité.
- Chauffer ou refroidir la solution d'environ 10 K. Aucune substance ne doit être perdue du fait de réactions chimiques, précipités ou évaporation.

2 Technique de mesure

- La différence entre la valeur mesurée et la valeur à la température de référence correspond à l'écart de mesure dû à la compensation en température. Le cas échéant adapter le coefficient de température au comportement de la solution à mesurer.

Salissures et dépôts

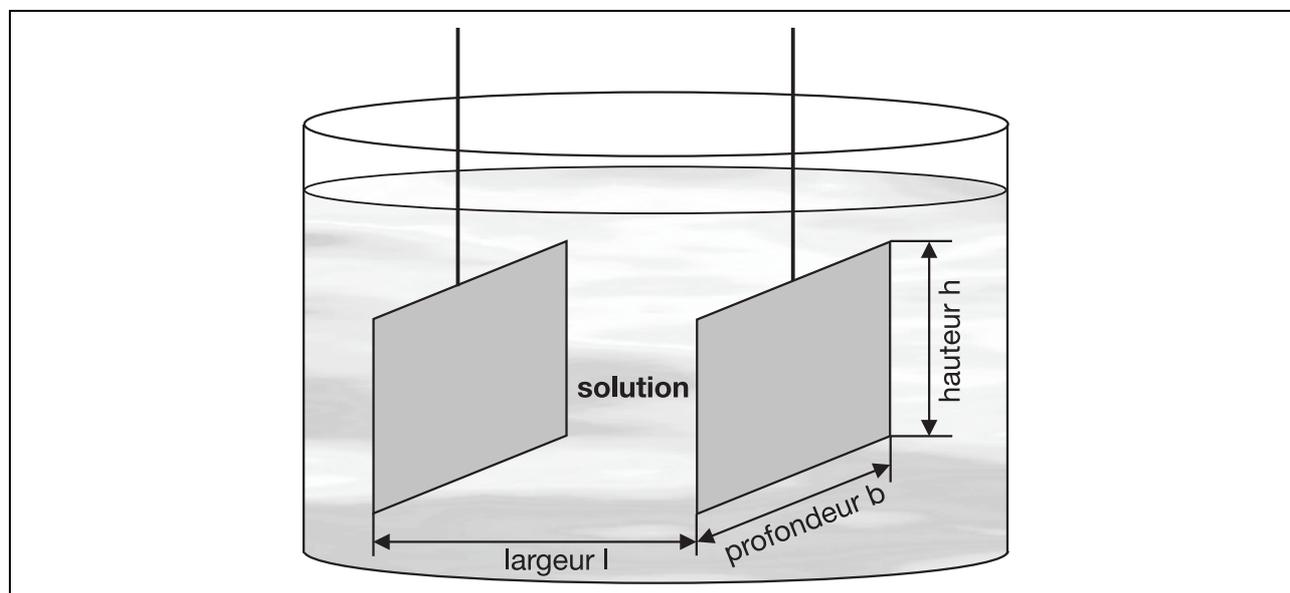


Figure 11 : électrodes réelles dans une solution à mesurer.

L'encrassement des électrodes donne, du fait de la diminution de leur surface, un résultat de mesure minoré. L'appareil de mesure des cellules à deux électrodes ne connaît que le signal de courant. Il utilise comme valeur de tension celle qui est appliquée aux électrodes de la cellule. Si un dépôt recouvre les électrodes, l'appareil ne mesure qu'un signal de courant et calcule une valeur de conductivité trop faible.

Il faut s'assurer avant toute mesure que l'état de la cellule est correct. L'état se détermine avec une solution de référence.

- Sur le convertisseur de mesure, régler à 0% le coefficient de température.
- Tempérer la solution de référence à la température de référence ± 1 K (20°C ou 25°C).
- Rincer la cellule de mesure avec un peu de solution de référence.
- Mesurer la conductivité de la solution de référence et comparer à la valeur théorique de la solution de référence.

Concentration en chlorure de potassium	Conductivité à 20°C	Conductivité à 25°C
$C_{(KCl)} = 0,01$ mol/l	1278 μ S/cm	1413 μ S/cm
$C_{(KCl)} = 0,1$ mol/l	12,2 mS/cm	12,9 mS/cm
$C_{(KCl)} = 3$ mol/l	275 mS/cm	298 mS/cm

Tableau 8 : conductivité de solutions de référence typiques.

- Si l'écart de mesure est trop grand, nettoyer les électrodes de la cellule de mesure.

2 Technique de mesure

Polarisation

La mesure s'effectue avec une tension alternative. L'appareil de mesure augmente la fréquence quand la conductivité augmente. Toutefois les cellules de mesure à deux électrodes connaissent une limite supérieure de conductivité, au-delà de laquelle il n'est plus possible de supprimer complètement la polarisation. Les résultats sont sous-évalués de façon évidente.

Ces sous-évaluations ne se produisent pas dans les cellules de mesure par induction ni dans les cellules à quatre électrodes.

2.2.4 Solutions de référence

Les solutions de référence servent au calibrage des dispositifs de mesure. Il s'agit de solutions aqueuses de chlorure de potassium avec une valeur de conductivité connue. Suivant leurs propriétés, les solutions de référence sont classées en références primaires, secondaires et de travail.

Les solutions de référence primaires offrent la plus petite incertitude sur la valeur de conductivité ($U(\gamma) = 0,03\%$). On les utilise surtout dans les instituts de métrologie.

Les solutions tampon de référence secondaires ont la même composition que les solutions primaires. L'incertitude sur leur valeur de conductivité est proche de $U(\gamma) = 0,12\%$.

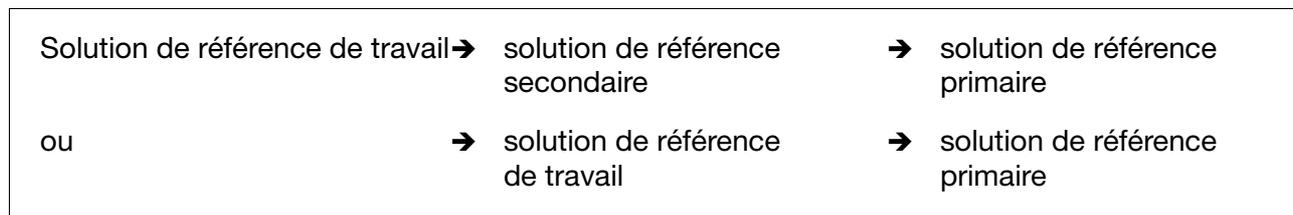
Les solutions de référence de travail sont utilisées dans la pratique ; leur incertitude dépend du fabricant mais doit se situer dans la plage de $U(\gamma) \pm 0,4\%$ à $U(\gamma) \pm 1\%$. Les solutions de référence de travail sont indiquées pour le calibrage des installations de production et des appareils de mesure portatifs.

Il existe des solutions de référence pour une plage de mesure de quelque $100\mu\text{S}/\text{cm}$ jusqu'à $10\text{mS}/\text{cm}$. Pour des valeurs supérieures, les fabricants donnent des indications sur les solutions adéquates.

Il suffit de tester une des solutions dans la partie supérieure de la plage de mesure autorisée. C'est dans ces conditions que les effets perturbateurs comme la polarisation et les salissures se font sentir le plus fortement.

Il est souvent question de la traçabilité des solutions de référence. La traçabilité se rapporte à la valeur de conductivité. Elle indique que la valeur a été comparée par le fabricant, directement ou par solution intermédiaire interposée (par ex. solution de référence secondaire), à une solution de référence primaire.

Exemple



La traçabilité de la valeur de conductivité est à la base du calcul de l'incertitude.

La notion d'assurance-qualité se rapportait initialement pour l'essentiel à la fabrication de divers produits tels que chaînes stéréo, appareils de mesure ou fromages. L'analyse était un moyen de garantir la qualité. Dans le cadre des Bonnes Pratiques de Laboratoire et des mesures de certification, comme par exemple ISO 9000, les laboratoires aussi ont dû s'interroger sur les questions de la qualité, des procédés de mesure, des mesures, dans le cadre des procédures opératoires standard (SOP). Ce processus a continué, si bien qu'aujourd'hui les règles de l'assurance-qualité s'imposent aussi dans le domaine de la mesure et de la régulation des process. Comme exemples, on trouve les codes de bonne pratique du LAWA (*Länderarbeitsgemeinschaft Wasser*, groupe de travail national sur l'eau), la directive ENV ISO 13530 ou le code de bonne pratique DVWK M 704 de l'ATV (*Abwassertechnischen Vereinigung*, groupement technique sur les eaux usées).

Quelle est la précision d'une mesure de conductivité ?

Une réponse sur la précision des mesures est pratiquement impossible. L'indication de la précision suppose que la valeur vraie est connue, ce qui n'est pas le cas en pratique. Ce qu'on peut estimer, c'est l'incertitude sur une valeur mesurée. La notion « d'estimation » doit toujours être associée au mot « environ », plutôt qu'à une détermination scientifique.

Une indication d'incertitude telle que $U(\gamma) \pm 5\%$ signifie que l'écart entre la valeur vraie de la conductivité de la solution, avec une vraisemblance de 95 %, est au maximum de $\Delta\gamma \pm 25\mu\text{S/cm}$ sur une valeur mesurée de $\gamma = 500\mu\text{S/cm}$. Si on réduit de moitié la valeur de l'incertitude, la vraisemblance n'est plus que de 67 %.

La connaissance de l'incertitude peut être particulièrement significative pour les mesures en production. La question est alors de savoir si une valeur limite a été dépassée.

Exemple

La valeur limite de conductivité est fixée à $\gamma = 1000\mu\text{S/cm}$, et la valeur mesurée est $\gamma = 970\mu\text{S/cm}$ avec une incertitude $U(\gamma) \pm 6\%$. Bien que la valeur mesurée $\gamma = 970\mu\text{S/cm}$ soit encore en-dessous de la valeur limite, le risque subsiste d'un dépassement de la valeur limite. C'est seulement avec une valeur inférieure $\gamma = 940\mu\text{S/cm}$ qu'un dépassement est (presque) complètement exclu.

Les mesures d'assurance-qualité contribuent essentiellement à réduire l'incertitude de mesure.

3.1 Documentation

Un élément essentiel de l'assurance-qualité est la documentation sur toutes les informations relatives à la mesure. Les enregistrements servent de preuve de l'état du dispositif de mesure et naturellement de l'objet mesuré. Les mesures collectées sur une longue période de temps constituent une bonne base de décision sur :

- l'entretien du dispositif de mesure,
- le pilotage des paramètres de l'eau,
- la détection des pannes en cas d'erreur,
- ou l'acquisition de nouveaux appareils de mesure.

La condition de ces possibilités et des suivantes est une documentation complète sur les valeurs mesurées et les conditions dans lesquelles elles ont été obtenues. Cela comprend les conditions de mesure, les dates de calibrage et de vérification et les données relatives au dispositif de mesure.

La documentation doit être complète, lisible et conçue de façon intelligible, de telle façon qu'il soit encore possible d'expliquer la situation après une longue période de temps.

L'enregistrement des valeurs mesurées se fait normalement par le convertisseur de mesure.

3 Assurance-qualité

Données générales

Un journal devra consigner toutes les données du point de mesure, du dispositif de mesure et éventuellement les opérations de maintenance effectuées :

- désignation et situation du point de mesure,
- adresse exacte de l'interlocuteur,
- numéros de série des composants du dispositif de mesure,
- dates d'acquisition et de mise en service du dispositif de mesure,
- date et motif des réparations,
- nom et adresse des prestataires de service pour l'entretien et les réparations.

Données de calibrage

Un rapport de calibrage contiendra les données suivantes :

- désignation et situation du point de mesure,
- numéros de série des composants du dispositif de mesure,
- nom de l'intervenant
- désignation, numéro de série et date de péremption des solutions tampon utilisées,
- date et données du calibrage
(par exemple valeur mesurée, température, consigne de la solution de référence).

Valeurs mesurées

Les enregistrements des valeurs mesurées contiendront en plus les données relatives à la date, l'heure et les paramètres accessoires pertinents, comme la température par exemple.

Données diverses

Une documentation complète comporte la description des procédés utilisés pour la mesure, y compris ceux des calibrages, réglages, maintenance et stockage du dispositif de mesure. De plus le classeur de documentation contiendra toutes les notices d'utilisation, toutes les prescriptions et consignes diverses.

3.2 Entretien

Un dispositif de mesure et en particulier une chaîne de mesure vieillissent en fonction des conditions de mesure. L'usure et les salissures réduisent sa fiabilité et introduisent des erreurs de mesure. Un calibrage régulier permet de détecter les composants non fiables et de les remettre dans leur état normal, par exemple par un nettoyage.

Entre les calibrages, il n'est possible de détecter un défaut de la fonction de mesure qu'aux moyen des valeurs enregistrées.

Une perturbation peut se manifester par une dispersion des mesures ou par des écarts inhabituels jusque là. La question de savoir si l'événement est normal ou s'il impose une intervention se règle en fonction des données de la documentation.

Dispersion des mesures

Des mesures divergentes ne sont pas à elles seules l'indication d'un défaut. La dispersion peut être causée par une altération normale de l'eau ou de la solution à mesurer, ou du processus de mesure.

Une des raisons pour lesquelles un dispositif de mesure peut donner des valeurs aberrantes serait par exemple une compensation en température mal réglée. L'appareil de mesure réagit maintenant aux variations de température avec des valeurs aberrantes.

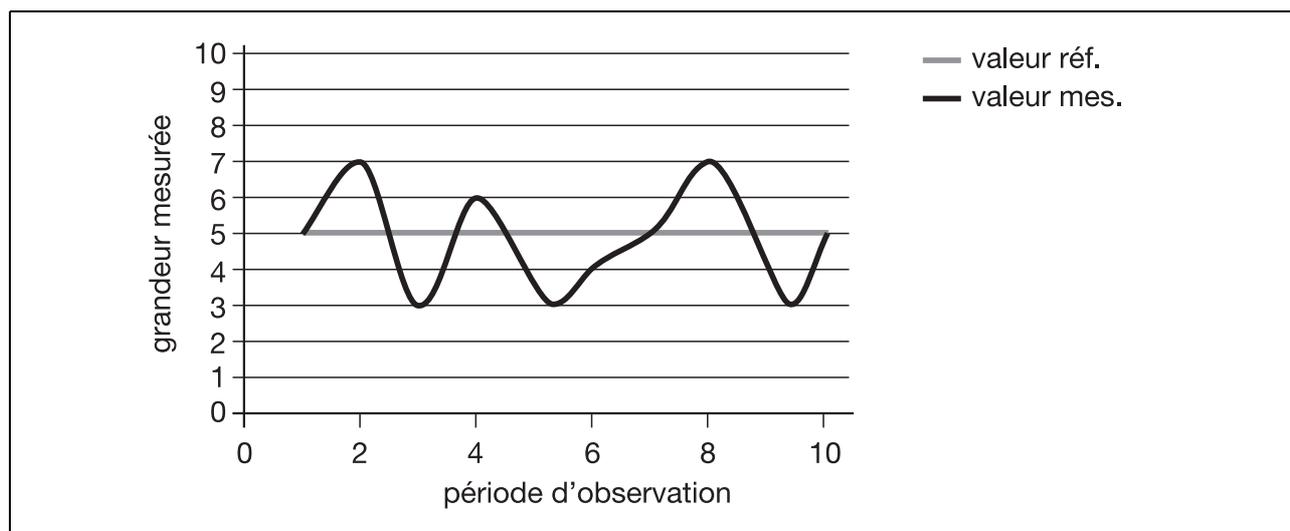


Figure 12 : les valeurs mesurées se dispersent irrégulièrement autour de la valeur de consigne.

3 Assurance-qualité

Dérive des valeurs mesurées

Le terme « dérive » désigne le processus de croissance ou de décroissance constante de la valeur mesurée.

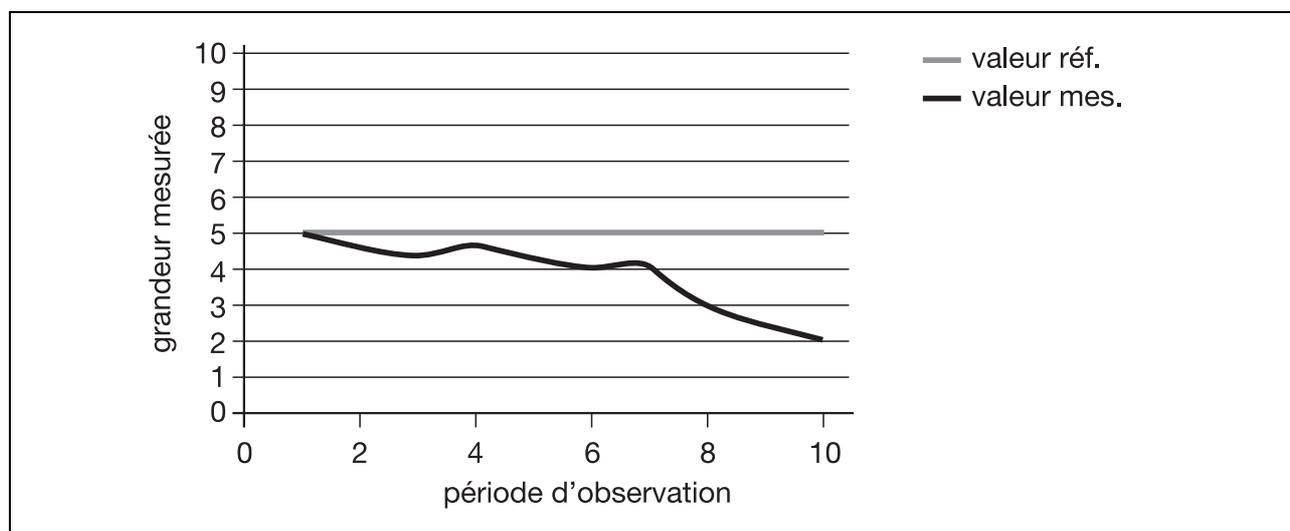


Figure 13 : Die Abweichung zwischen des Mess- und Sollwerten nimmt mit der Zeit zu

Des valeurs croissantes ne sont pas liées au dispositif de mesure. La cause des valeurs décroissantes peut être recherchée dans un encrassement des électrodes dans les systèmes à deux électrodes pour une conductivité supérieure à $100\mu\text{S}/\text{cm}$. Les dépôts augmentent la résistance des électrodes, ce qui fait diminuer le courant.

Variations brutales

Si un écart manifeste entre les valeurs mesurées se présente dans un intervalle de quelques minutes, une perturbation électrique est vraisemblable. Il se peut aussi que, simplement, la sonde ne soit plus immergée dans l'eau.

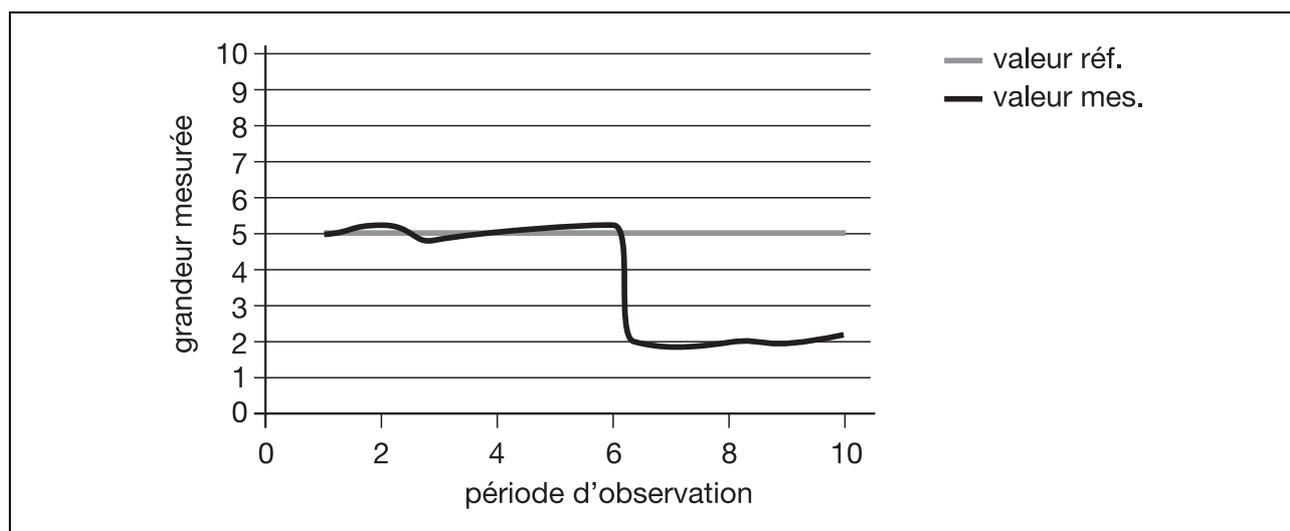


Figure 14 : un écart significatif entre la valeur mesurée et la valeur de consigne se présente dans un intervalle de quelques minutes.

3.3 Problèmes/Mesures

Problème	Causes possibles	Mesures
Pas d'affichage de mesure ou sortie bloquée	Défaut d'alimentation	Vérifier l'alimentation et les connecteurs
Affichage « 000 » ou sortie bloquée « 0 % »	Le capteur n'est pas plongé dans le milieu ; niveau du réservoir trop bas	Remplir le réservoir
	Armature de passage obturée	Nettoyer l'armature de passage
	Capteur défectueux	Vérifier le capteur
	Câble de capteur défectueux	Vérifier le câble du capteur
Valeur affichée fausse ou instable	Capteur insuffisamment immergé	Remplir le réservoir ou l'armature de passage
	Pas de mélange	Veiller à un bon mélange Maintenir tout autour du capteur environ 5mm d'espace de brassage
	Bulles d'air	Vérifier le point de montage
	Parasites électriques	Rechercher dans l'alimentation les parasites inadmissibles (par ex. mauvais isolement des convertisseurs de fréquence). Vérifier le matériau de câblage du capteur (utiliser des câbles blindés). Vérifier le cheminement des lignes (pas de parcours parallèle à celui de gros consommateurs de puissance).
	Dépôts sur les surfaces de mesure	Nettoyer la cellule de mesure, voir section 3.4 „Nettoyage“
	Coefficient de température incorrect	Temperaturkoeffizient korrekt ermitteln, voir section 2.2.2 „Calibrage/réglage“
	Coefficients de température différents sur l'appareil de travail et l'appareil de référence	voir section 2.2.3 „Conditions de mesure“
	Températures de référence de l'appareil de mesure de référence et de l'appareil de travail différentes	voir section 2.2.3 „Conditions de mesure“
	Polarisation	our de fortes valeurs de conductivité (supérieures à 10mS/cm environ), appliquer le principe de mesure par induction, voir section 1.2.4 „Principes de mesure“ ou section 2.1.1 „Cellule de mesure“

Tableau 9 : Solutions au problème

3.4 Nettoyage

Si l'écart de mesure est trop grand lors de la vérification avec la solution de référence, le nettoyage ou le remplacement de la cellule de mesure sont les seules mesures efficaces pour supprimer le défaut. L'agent nettoyant dépend d'abord de la nature des salissures. Dans la plupart des cas, de l'eau chaude et un peu de nettoyant ménager suffisent pour éliminer les graisses et les huiles. Les

3 Assurance-qualité

dépôts de calcaire ou de rouille s'éliminent au vinaigre, à l'acide citrique ou à l'acide chlorhydrique dilué.

Remarque

Ne jamais nettoyer mécaniquement les cellules de mesure à électrodes platinées. Tout contact mécanique endommage la surface platinée. Le seul remède est alors de recommencer le placage en platine.

3.5 Possibilités de test sur le terrain

La question récurrente posée aux fabricants par les techniciens de la mesure et de la régulation est celle de la sécurité des mesures en continu. Dans le cas de l'eau ultra-pure en particulier, seules les mesures en laboratoires permettent des comparaisons. Les possibilités suivantes s'offrent aux exploitants d'installations sur le terrain.

Vérification du convertisseur de mesure

Le convertisseur de mesure peut être testé avec des résistances de précision. On suppose toutefois que le convertisseur n'a pas perdu (dans des circonstances normales) la précision de son étalonnage.

Re-calibrage de la constante de cellule

Comme la cellule de mesure est exposée au milieu à mesurer et aux substances qu'il contient, il est logique de la contrôler (détermination de la constante de cellule) à intervalles réguliers.

Intervalle entre les contrôles

L'intervalle entre les contrôles est déterminé soit par l'exploitant de l'installation, soit par les dispositions légales. Lors du contrôle, le convertisseur de mesure est accordé avec la nouvelle constante de cellule (modifiée).

Mesure de comparaison

Une mesure de comparaison avec un appareil de référence permet de déterminer à nouveau la constante de la cellule de mesure pour eau ultra-pure. Il faut alors veiller à désactiver la compensation de température sur les deux appareils (JUMO et appareil de référence), c'est-à-dire la régler à 0%/K. C'est ainsi qu'on obtient l'affichage de la valeur réelle de la conductivité et qu'on évite les écarts dus à des fonctionnements différents de la compensation en température.

Calibrage chez le fabricant

Si l'utilisateur ne dispose pas des moyens de mesure et de test adéquats, la constante de la cellule de mesure peut aussi être remesurée chez le fabricant (par ex. JUMO).

Dans ce cas il peut être indiqué de disposer sur le terrain d'une deuxième cellule de mesure de conductivité, de façon à éviter tout arrêt.

3.6 Stockage de la cellule de mesure

Les cellules de mesure de conductivité peuvent être stockées au sec sans problème et supportent bien le stockage.

Remarque

Le stockage dans la poussière, les restes de condensation de vapeur d'eau, l'altération des surfaces par une atmosphère agressive, entre autres, modifient la constante de cellule (section 3.3 „Problèmes/Mesures“).

Les cellules de mesure à électrodes platinées seront impérativement stockées dans de l'eau désionisée. Le séchage endommage la surface platinée et le seul remède est de recommencer le placage en platine.

Les mesures de conductivité sont pratiquées dans de nombreux domaines de la technique et de la protection de l'environnement. Suivant l'application, la mesure se passe au laboratoire, sur le terrain avec un appareil portatif ou en continu, par exemple dans un process.

Les cas suivants d'applications pratiques seront examinés plus en détail. Mesures de conductivité dans :

- Stations d'épuration d'eaux usées
- Galvanisation
- Installation de remplissage de boissons
- Industrie pharmaceutique
- Centrales de production d'énergie
- Stations de déminéralisation totale

4.1 Stations d'épuration d'eaux usées

La conductivité des eaux usées domestiques est un peu plus forte que celle de l'eau potable distribuée dans la région. Plus la conductivité de l'eau potable est élevée, plus faible est l'augmentation relative de la conductivité des eaux usées. Les dispositifs de mesure de conductivité ne se trouvent dans les stations d'épuration municipales que si des arrivées industrielles font craindre une élévation plus forte. On rencontre plus souvent les dispositifs de mesure de conductivité dans les installations industrielles, comme le montrent les exemples suivants.

Le dispositif de mesure dépend du type de salissure, de la température ou des agressions chimiques.

Dans le cas de salissures, les cellules de mesure à quatre électrodes (mesure dans des bassins ou des drains) ou inductives (mesures dans les conduites ou des eaux usées agressives) sont optimales.

Pour les eaux usées chargées de façon significative en produits chimiques, ou sujettes à de fortes variations de température, le convertisseur de mesure doit accepter une plage de réglage suffisante du coefficient de température.

4 Applications

4.2 Galvanisation

L'eau des bains de rinçage est recyclée. Un échangeur d'ions la dessale avant qu'elle retourne dans les bassins de rinçage. Les substances ionogènes de l'eau de rinçage sont retenues par la résine de l'échangeur d'ions. Ces substances précipitent sous forme concentrée lors de la régénération, mais dans de petites quantités de liquide.

L'échangeur d'ions ne réagit pas au volume de l'eau, mais à sa charge en sels. Comme la régénération de la résine fait passer la teneur totale en sels des eaux usées au minimum au double, il est bienvenu de limiter la teneur totale en sels. On y parvient par des rinçages statiques ou un pré-rinçage lent.

La concentration d'un seul rinçage statique ne doit pas dépasser en moyenne 10% de celle de l'eau du process précédent. Une cascade de pré-rinçages est recommandée.

L'eau pure doit présenter pour la plupart des utilisations une conductivité inférieure à 30 μ S/cm. Un dispositif de mesure standard est suffisant pour cette application.

4.3 Installations de remplissage de boissons

Les installations de remplissage de boissons, qu'il s'agisse de bière, de limonade ou de vin, posent des exigences très élevées quant à l'hygiène. C'est aussi vrai en ce qui concerne la protection du consommateur que pour la conservation des boissons.

Les tanks et conduites sont nettoyés à fond après une opération de remplissage. Il est important qu'un rinçage final élimine complètement l'agent nettoyant. Un rinçage trop long augmente inutilement le coût de l'opération d'une part, le volume des eaux usées d'autre part.

La mesure de conductivité permet simultanément de contrôler la concentration en agent de nettoyage et de connaître le moment précis où il est complètement éliminé.

La cellule de mesure doit pouvoir résister aux détergents souvent très agressifs et chauds, et à des valeurs de conductivité parfois très élevées. L'idéal pour cette application est le procédé de mesure par induction puisque le dispositif de mesure lui-même n'entre pas en contact avec la solution à mesurer.

Le convertisseur de mesure doit avoir un réglage variable en fonction du comportement en température de la solution à mesurer, parce que la température et les comportements en fonction de la température peuvent varier fortement suivant les cycles de rinçage.

4.4 Usines de production d'énergie

Généralités

L'eau utilisée dans les usines de production d'énergie doit être particulièrement pure. Cette eau présente l'inconvénient d'être très agressive et de pouvoir provoquer de graves dégâts par corrosion.

Une eau n'est utilisable dans la production d'énergie qu'après être passée par un certain nombre d'étapes de préparation.

Eau d'alimentation des chaudières

L'eau des chaudières sert à produire de la vapeur. Les impuretés dissoutes restent après le processus de vaporisation, si bien que leur concentration augmente avec le temps. Avec une concentration excessive, des couches de dépôt dangereuses se forment sur les parois de la chaudière. L'isolation thermique qui en résulte risque de réduire la puissance de la chaudière de plus de 10%. La détérioration de la couche de dépôt, liée à une surchauffe localisée, a pu conduire dans le passé à plusieurs explosions de chaudières. L'alimentation en eau de la chaudière ne doit donc pas se contenter de remplacer l'eau vaporisée, mais elle doit en même temps diminuer la concentration en impuretés. L'eau d'alimentation de la chaudière elle-même doit être exempte, autant que possible, de substances dissoutes ; elle ne doit contenir, au plus, qu'un alcalinisant, par exemple de l'ammoniaque.

La limite d'impureté de l'eau se calcule avec l'index de Langlier à partir de la conductivité. Elle est fixée à $\gamma_{(25^{\circ}\text{C})} = 0,2\mu\text{S}/\text{cm}$ pour l'eau d'alimentation des chaudières.

Condensats

L'eau captée par condensation de la vapeur possède un tel degré de pureté qu'elle peut être réutilisée directement pour l'alimentation de la chaudière. C'est pratiquement de l'eau distillée.

Toutefois des impuretés risquent d'arriver dans le condensat du fait de fuites dans le refroidissement du condenseur. Même des fuites minimales sont détectables immédiatement par une comparaison des valeurs de conductivité avant et après le refroidissement.

Eau de refroidissement

Pour protéger les générateurs contre la corrosion, un haut degré de pureté de l'eau du circuit de refroidissement est nécessaire aussi. Trois cellules de mesure de la conductivité dans le circuit permettent d'élever le niveau de sécurité contre les dégâts de la corrosion. Si deux des trois points de mesure accusent un dépassement de la valeur limite, l'arrêt d'urgence est déclenché.

Mesure

L'eau pure pose des exigences considérables sur la technique de mesure utilisée. Même les plus petites impuretés de l'air ou des matériaux du dispositif de mesure risquent d'augmenter notablement la conductivité. C'est pourquoi la mesure de conductivité se fait sur le flux. Les matériaux de la cellule de mesure et de l'armature de passage ne doivent pas influencer eux-mêmes sur la conductivité, comme c'est le cas par exemple avec le verre. Les cellules de mesure et conduits en acier VA sont préférés pour cette application.

L'eau ultra-pure présente une très faible conductivité. Une constante de cellule $k' = 0,1\text{ cm}^{-1}$, ou mieux $k' = 0,01\text{ cm}^{-1}$, est la condition d'un signal de mesure suffisant. On peut amplifier le signal de mesure par l'insertion avant la cellule de mesure d'un échangeur d'ions fortement acide. Il amplifie le signal d'un facteur 3 à 4, parce que les cations dissous sont échangés contre des ions hydrogène de plus forte conductivité équivalente. De plus, l'échangeur évite l'effet perturbateur de l'alcalinisant.

4 Applications

Une propriété significative du convertisseur de mesure est la compensation en température.

La température du condenseur est beaucoup plus élevée avant le refroidisseur qu'après. Pour permettre de détecter à coup sûr de faibles différences de conductivité, le convertisseur de mesure doit appliquer une compensation fiable à la température de référence.

Dans le système de refroidissement, les températures se différencient suivant la disposition physique du point de mesure. La comparaison des mesures n'est possible qu'avec une compensation fiable.

Le comportement en température pour ces très faibles conductivités dépend de deux facteurs :

- la conductivité de l'eau
- et la conductivité des substances dissoutes.

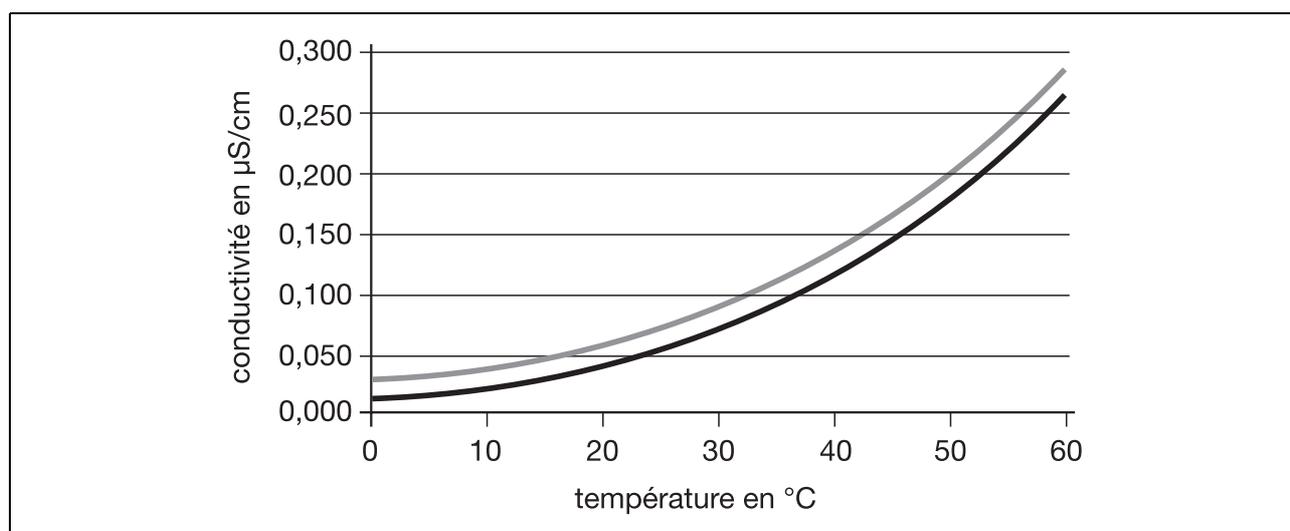


Figure 15 : conductivité totale de l'eau (courbe en gris), conductivité propre de l'eau (courbe en noir).

Le comportement en température de la conductivité propre de l'eau résulte essentiellement de la dissociation des molécules d'eau et de la viscosité de l'eau. Ce comportement est très prononcé.

Derrière l'échangeur d'ions, il est question des substances dissoutes et des ions hydrogène avec les ions opposés correspondants. D'une part ces ions montrent un comportement en température propre, d'autre part ils agissent directement sur le processus de dissociation de l'eau. Plus la proportion d'ions hydrogène est forte, plus faible est la conductivité propre de l'eau. Avec une conductivité supérieure à 1 µS/cm, les ions hydrogène sont les seuls à déterminer le comportement en température de l'eau.

Les convertisseurs de mesure modernes pour la mesure de conductivité de l'eau ultra-pure prennent en compte ces considérations automatiquement dans la compensation de température³.

³ On trouvera des informations complémentaires dans le « Guide de la mesure dans l'eau ultra-pure, FAS 614 ».

4.5 Pharmacie

L'industrie pharmaceutique utilise de l'eau qui doit être conforme aux exigences USP (*water conductivity* <645>, United States Pharmacopeia). Le critère de conformité dépend de la conductivité et du pH.

Mesure

La mesure de conductivité est effectuée sans compensation. Les valeurs mesurées ne doivent pas dépasser les limites du tableau suivant.

Température en °C	Conductivité en $\mu\text{S}/\text{cm}$	Température en °C	Conductivité en $\mu\text{S}/\text{cm}$
0	0,6	55	2,1
5	0,8	60	2,2
10	0,9	65	2,4
15	1,0	70	2,5
20	1,1	75	2,7
25	1,3	80	2,7
30	1,4	85	2,7
35	1,5	90	2,7
40	1,7	95	2,9
45	1,8	100	3,1
50	1,9	-	-

Tableau 10 : valeurs limites de conductivité selon valeurs limites USP (*water conductivity* <645>, stage 1).

Test de l'acide carbonique (stage 2)

Si la valeur est trop élevée, il est tout de même possible d'utiliser l'eau à condition que les résultats de deux autres tests soient positifs.

L'échantillon d'eau est agité fortement à une température $\vartheta = 25 \pm 1^\circ\text{C}$. Si la conductivité vaut $2,1 \mu\text{S}/\text{cm}$ au maximum, l'eau est utilisable en production. Si la valeur est supérieure, l'eau est utilisable en fonction d'une mesure de pH.

Test de pH

On ajoute 0,3 ml d'une solution saturée de chlorure de potassium pour 100 ml d'échantillon d'eau, de façon à stabiliser la mesure de pH. La température doit être constante, $25 \pm 1^\circ\text{C}$, pendant la mesure. La valeur de pH mesurée doit maintenant se situer entre 5,0 et 7,0. À partir de là, la conductivité ne doit pas dépasser les valeurs du tableau suivant.

4 Applications

pH	Conductivité en $\mu\text{S/cm}$	pH	Conductivité in $\mu\text{S/cm}$
5.0	4,7	6.1	2.4
5,1	4,1	6.2	2.5
5.2	3,6	6,3	2.4
5.3	3.3	6,4	2.3
5,4	3,0	6.5	2.2
5,5	2.8	6.6	2.1
5,6	2.6	6.7	2,6
5.7	2.5	6.8	3,1
5,8	2,4	6,9	3,8
5,9	2.4	7,0	4.6
6.0	2,4		

Tableau 11 : valeurs limites de conductivité suivant valeurs limites USP (water conductivity <645>, stage 3).

Pour l'utilisation dans l'industrie pharmaceutique, le fabricant doit fournir un certificat de calibrage de l'appareil de mesure de la conductivité. La résolution de l'appareil doit être au minimum de $0,1\mu\text{S/cm}$. L'incertitude de l'appareil (sans l'incertitude de la cellule) sera au maximum $U(\gamma) \pm 0,1\mu\text{S/cm}$. L'incertitude maximale rapportée à la cellule de mesure est $U(\gamma) \pm 2\%$.

4.6 Stations de déminéralisation totale

L'eau désionisée correspond dans les laboratoires d'analyse et dans de nombreux domaines de l'industrie à une donnée qui va de soi.

L'eau provient surtout d'installations de désionisation, mais aussi d'inversion-osmose et de distillation.

La conductivité doit être adaptée à l'utilisation envisagée. Diverses « qualités d'eau de laboratoire » sont définies par exemple dans la norme DIN ISO 3696 (« Eau pour laboratoire à usage analytique ») ou dans la norme ASTM D 1193-99e1 (« Standard specification for reagent water »).

Les échangeurs d'ions n'ont qu'une capacité limitée. Si elle est dépassée, la barrière que représente l'échangeur est franchie d'abord par les ions de sodium ou les ions chlorure. La conductivité de l'eau augmente et accuse l'épuisement du matériau échangeur.

Une surveillance constante évite l'utilisation d'une eau de qualité diminuée. La cellule de mesure et l'armature de passage doivent être en acier. Les matériaux tels que le verre engendrent une surévaluation de la mesure par la libération de particules ionisées.

La compensation de température est importante pour les convertisseurs de mesure. Le comportement en température aux très faibles valeurs de conductivité dépend de deux facteurs :

- la conductivité propre de l'eau
- et la conductivité des substances dissoutes.

Après épuisement du matériau échangeur, ce sont d'abord les ions sodium et chlorure qui pénètrent dans le matériau de l'échangeur. Ces ions possèdent leur propre comportement en température. Les convertisseurs de mesure modernes pour la mesure dans l'eau ultra-pure prennent en compte ces relations dans la compensation automatique de température.

4.7 Mesure de la concentration

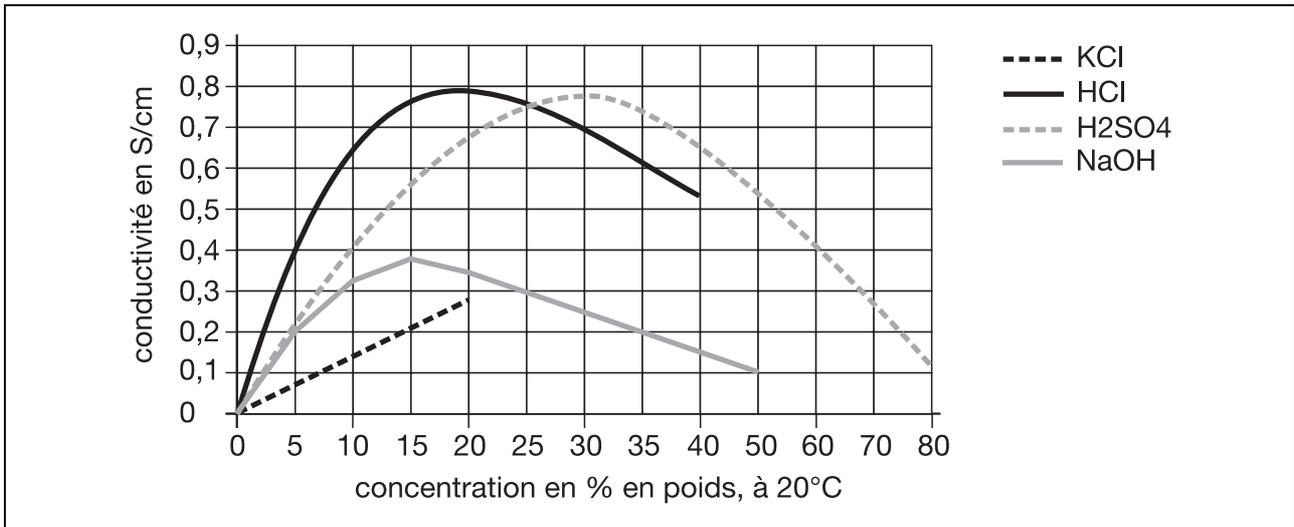


Figure 16 : relation entre concentration et conductivité (pour différentes substances).

Une mesure de conductivité ne donne aucune information sur la nature des substances dissoutes. La valeur peut être due à des ions quelconques. Pour les solutions de composition variable ou inconnue, la mesure de conductivité tient lieu de mesure de concentration.

Il en va autrement pour les solutions de composition connue. Dans ce cas, la mesure de conductivité peut fournir une mesure très précise de la concentration. Un tableau ou une fonction de calibrage permettent de convertir directement la mesure de conductivité en une valeur de concentration.

Dans certains domaines d'application, on affiche la concentration au lieu de la conductivité (par ex. pour doser avec précision des acides ou des bases).

La relation entre conductivité et concentration des acides et bases est en grande partie non linéaire et ne peut donc être représentée avec la précision reproductible nécessaire qu'avec des appareils à microprocesseur.

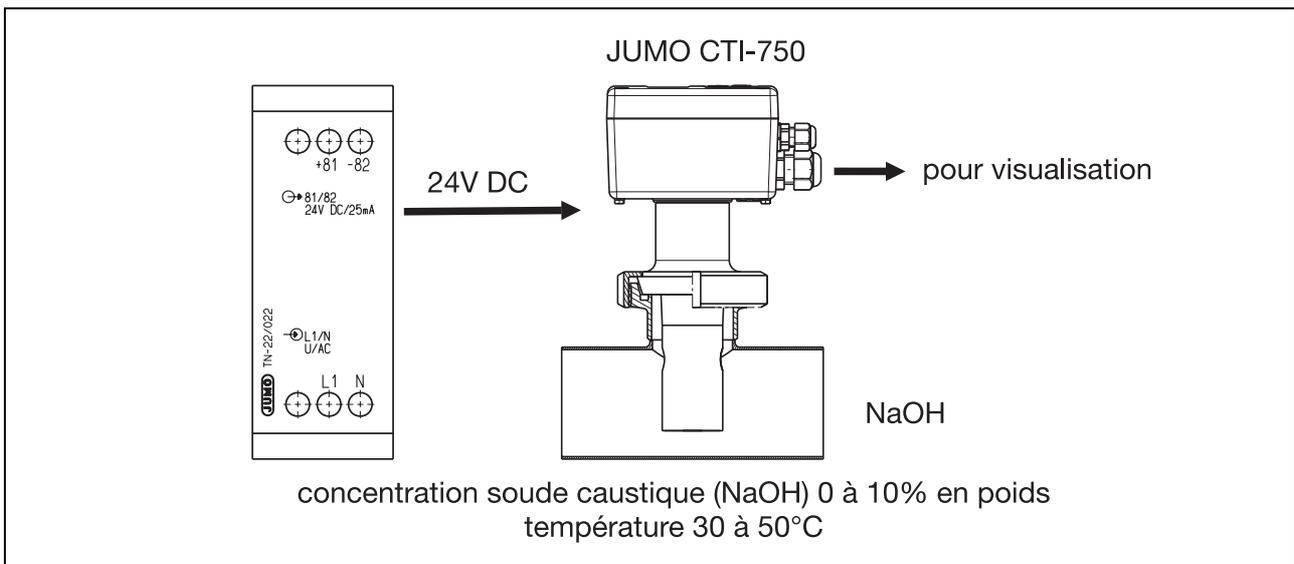


Figure 17 : Le JUMO CTI-750 calcule directement la concentration présente.

4 Applications

TDS (Total Dissolved Solids)

Cette valeur est importante par ex. dans l'analyse de la nappe phréatique et dans le domaine des centrales électriques. Cette valeur est encore utilisée dans l'étude de la qualité de l'eau (par ex. aux E.U, pays arabes et asiatiques).

Différentes organisations ont publié des valeurs limites sur ce thème

- WHO (**World Health Organisation**) <1000mg/l
- USEPA (**United States Environmental Protection Agency**)<500mg/l

La détermination adaptée aux normes est gravimétrique, c.-à-d. :

- filtrer l'échantillon,
- concentrer le filtrat,
- peser le résidu.

La mesure de la conductivité est utilisée pour la mesure en ligne. Il suffit de définir une seule fois le facteur de conversion. Il correspond au rapport entre la valeur de conductivité de l'eau et la valeur du résidu sec du filtrat TDS (Total Dissolved Solids). Le facteur est compris dans la plage 0,55-1,0. Une valeur habituelle pour l'eau potable se situe à 0,67 env.

Avec les appareils modernes, comme par ex. le JUMO AQUIS 500 CR ce facteur peut être entré individuellement et de ce fait d'obtenir la mesure la plus précise possible.

Salinité

La notion de salinité est usuelle dans le domaine de l'analyse de l'eau de mer. Initialement la valeur de salinité en ‰ se rapportait aux *International Oceanographic Tables* (IOT), dans lesquelles la conductivité est rapportée à une solution saline dont la composition correspond à la composition moyenne de l'eau de mer. Aujourd'hui la valeur de salinité est sans dimension et se rapporte à une solution de chlorure de potassium (32,4356g/kg).

Équivalent chlorure de sodium

L'équivalent chlorure de sodium est usité dans le domaine de la production d'énergie. Cette valeur exprime la conductivité en mg/l de NaCl. Cette donnée repose sur le fait que les ions sodium et chlorure s'échappent d'abord par l'installation d'échange d'ions.

5 Aspects juridiques

Les installations de traitement des eaux usées sont soumises à agrément. Il en découle pour les exploitants une série d'obligations. Ce sont entre autres :

- demande d'agrément préalable aux autorités,
- dans le cas de création ou de rénovation d'une partie d'installation, les mêmes demandes préalables doivent être présentées,
- des valeurs limites doivent être respectées,
- si nécessaire, le respect des règlements en matière d'eaux usées sera imposé et contrôlé,
- les bases juridiques sont fixées dans les directives européennes, lois fédérales (Allemagne), lois nationales et arrêtés municipaux. Les directives européennes sont introduites à court ou moyen terme dans le droit national.

Il est certain que le projet, la construction et la mise en service des installations de traitement des eaux usées ne sont pas des sinécures et qu'un tas de paragraphes d'une foule de règlements sont à prendre en compte.

5 Aspects juridiques

- APHA, AWWA, WEF,
Standard Methods for the Examination of water and wastewater, 2510, Conductivity
- ASTM D1125-95 (Reapproved 1999),
Standard Test Methods for Electrical Conductivity and Resistivity of Water
- ASTM D1193-99
Standard Specification for Reagent Water
- ASTM D 5391-99
Standard Test Method for Electrical Conductivity
and Resistivity of a Flowing High Purity Water Sample
- DIN EN V 13005,
Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen, édition allemande 13005:1999,
juin 1999
[EN V 13005, Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure]
- DIN EN 27888,
Bestimmung der elektrischen Leitfähigkeit,
novembre 1993
[NF EN 27888, Détermination de la conductivité électrique]
- DIN EN 45001,
Allgemeine Kriterien zum Betreiben von Prüflaboratorien, EN 45001:1989,
mai 1989
- DIN IEC 746-3,
Angabe des Betriebsverhaltens von Elektrochemischen Analysatoren, Elektrische Leitfähigkeit,
janvier 1988
[Indications sur la tenue en service des analyseurs électrochimiques, conductivité électrique]
- DIN ISO 3696,
Wasser für analytische Zwecke,
juin 1991
[NF EN ISO 3696, Eau pour laboratoire à usage analytique]
- VGB Cooling Water Guideline, VGB-R 455 P e,
VGB Technischen Vereinigung der Großkraftwerksbetreiber e. V.,
1992
- VGB-Richtlinie für Kesselspeisewasser, Kesselwasser und Dampf von Dampferzeugern
über 68bar zulässigem Betriebsüberdruck,
VGB-R 450-L, VGB Technischen Vereinigung der Großkraftwerksbetreiber e. V.,
1995
- Kremer M.,
Dokumentierte Reinheit, Dokumentierte Reinheit von Messsystemen für Reinstwasser,
Chemie Technik 29, Nr. 5,
2000
- Morash K. R., Thornton R. D. ...,
Measurement of the resistivity of high-purity water at elevated temperature,
Ultra-pure water journal,
1994

6 Sources

- United States Pharmacopeia, (USP), water conductivity <645>
(version actuelle)
- Physikalisch-Technische Bundesanstalt,
Rückführbare Bestimmung der elektrolytischen Leitfähigkeit,
www.ptb.de
- Wu Y. C.,
Absolute Determination of Electric Conductivity
for Primary Standard KCl Solutions from 0 to 50°C,
Journal of Solution Chemistry, Vol. 20, No. 4,
1991

7.1 Exemple de rapport d'essai d'une cellule de mesure

JUMO GmbH & Co. KG
Moltkestraße 13 - 31
36039 Fulda, Germany

Telefon:
E-Mail: mail@jumo.net
Internet: www.jumo.net



Prüfprotokoll / test report / Certificat d'essai

1. Prüfgegenstand / Test instrument / Echantillon

Leitfähigkeitsmesszelle / conductivity cell / Cellule de mesure de conductivité :		
max. Druck / max. pressure / Pression max. :		
max. Temperatur / max. temperature / Température max. :		
Körpermaterial / material / Matériau :		
Elektrodenmaterial / electrode material / Matériau de l'électrode:		
Typenblatt / data sheet / Fiche technique :		
Auftraggeber/ Besteller / customer / Committant :		
Best.Nr. / order-no. / N° de commande :		
Komm-Nr.: comm-no.: N° comm. :		Teile-Nr.: part-no.: N° d'article :
		Fabr.-Nr.: fabr.-no.: N° fab. ::

2. Prüfverfahren / Test procedure / Méthode d'essai

Die Zellenkonstante der Zwei-Elektroden-Leitfähigkeitsmesszelle wird in Anlehnung an ASTM D1125-95 und ASTM D 5391-99 durch Vergleichsmessung ermittelt.

The cell constant of the 2-electrode conductivity cell is determined with the help of ASTM D 1125-95 and ASTM D 5391-99 by comparison measurement.

La constante cellulaire des 2 électrodes des cellules de mesure de conductivité est définie par mesure comparative à l'aide de ASTM D1125-95 et ASTM D 5391-99.

Die Leitfähigkeit der Prüflösung beträgt: µS/cm.

The conductivity of the test liquid is:

La conductivité de la solution d'essai est de :

3. Messergebnisse / Measuring results / Résultats de la mesure

Messwerte zum Zeitpunkt der Auslieferung./ Measuring values at the moment of delivery / Valeurs mesurées au moment de la livraison.

Zellenkonstante: K= 1/cm

Cell constant.

Constante cellulaire

Am Messumformer als relative Zellenkonstante einzugebender Wert:

You have to input the following relative cell constant to the transmitter:

Valeur à entrer au niveau du convertisseur de mesure comme constante cellulaire relative :
%

4. Messunsicherheit / Measuring uncertainty / Incertitude de mesure

Die Messunsicherheit liegt innerhalb der von USP25 vorgegebenen Toleranzen von +/- 2%.

The measuring uncertainty is within the tolerances of +/- 2% cited in the USP25.

L'incertitude de mesure se situe à l'intérieur des tolérances indiquées par USP25 à +/- 2 %

Datum / date
/ Date _____

Prüfer / signat./
Vérificateur _____

7 Annexe

7.2 Exemple de certificat de calibrage d'un convertisseur de mesure

JUMO REGULATION S.A.
7, rue des drapiers
Actipôle Borny
57075 METZ cedex 3



Certificat d'étalonnage

Prüfprotokoll – Calibration certificat

N° 05-400988/0010/0001

Client : **CEBAL FRANCE**
Kunde/Customer 51800 VIENNE LE CHATEAU

Votre commande : 4500260547/VI
Ihren Auftragsnummer, your order-number

Appareil vérifié :
Gepprüftes Gerät/Calibrated instrument
Désignation : *Bezeichnung/Reference* Manomètre

Constructeur : *Hersteller / Constructor* JUMO

Type : *Typ/Type* Manic 407

N° de série : *Serien-Nummer/Serial number*

F. Nr :

N° d'identification : VI MAN001
Identifizierung Nummer/Identity number

Etendue de mesure : 0+10 bar
Messbereich-span/Scale range

Classe de précision : *Klasse/Class* 1.0

Ce constat comprend 3 pages et 1 annexe(s).

Dieser Bericht beinhaltet 3 Seiten und 1 Anhang /That certificat is composed of 3 page and 1 complement

Metz le: 22/04/2005

Le chef de service : Mr GUILLON
Abteilungsleiter / Product Manager

Signature :
Unterschrift/Signature

P.O. Mr SCHMIDT

L'opérateur :Mr KANICKI
Prüfer/Operator

Signature :
Unterschrift/Signature

La reproduction de ce document n'est autorisée que sous la forme de fac-similé photographique intégral
Die Vervielfältigung dieses Dokuments kann nur vollständig geschehen. /The reproduction of that document can only Be done completely.

Page : 1 / 3
Seite/page

FE64MT01 indice 2

Littérature professionnelle de JUMO – Instructif pour débutants et pratiquants

Le savoir-faire n'est pas seulement nécessaire pour la fabrication de produits JUMO, mais il est également indispensable pour les applications ultérieures.

C'est pourquoi nous proposons à nos utilisateurs quelques publications concernant la mesure et la régulation.

L'objectif de ces publications est de familiariser débutants et pratiquants aux différents domaines d'application.



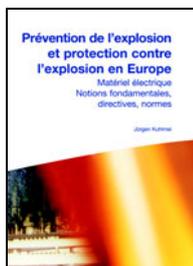
Mesure électrique de la température Avec des thermocouples et des sondes à résistance *Matthias Nau*

FAS 146
Référence article : 00431166



Régulation Initiation à la régulation par une approche pratique *Manfred Schleicher*

FAS 525
Référence article : 00363187



Prévention de l'explosion et protection contre l'explosion en Europe Matériel électrique Notions fondamentales, directives, normes *Jürgen Kuhlmei*

FAS 547
Référence article : 00414315



Guide de la mesure dans l'eau ultra-pure *Reinhard Manns*

FAS 614
Référence article : 00375624



Guide de la mesure du potentiel redox *Ulrich Braun*

FAS 615
Référence article : 00398258



Guide de la mesure ampérométrique du chlore libre, du dioxyde de chlore et de l'ozone dans l'eau *Dr. Jürgen Schleicher*

FAS 619
Référence article : 00398145



Sectionneur de puissance électronique *Manfred Schleicher, Winfried Schneider*

FAS 620
Référence article : 00413089



Guide de la mesure du pH *Matthias Kremer*

FAS 622
Référence article : 00418858

Littérature professionnelle de JUMO – Instructif pour débutants et pratiquants



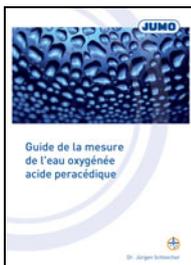
**Guide de la mesure
de conductivité**
Reinhard Manns

FAS 624
Référence article : 00411340



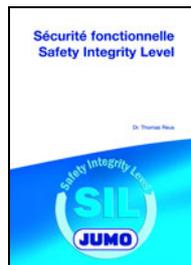
**Etude des erreurs d'une chaîne
de mesure de température
avec exemples de calcul**
Gerd Scheller

FAS 625
Référence article : 00429854



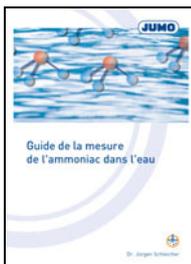
**Guide de la mesure
de l'eau oxygénée
acide peracédique**
Dr. Jürgen Schleicher

FAS 628
Référence article : 00420699



**Sécurité fonctionnelle
Safety Integrity Level**
Dr. Thomas Reus

FAS 630
Référence article : 00467800



**Guide de la mesure
de l'ammoniac dans l'eau**
Dr. Jürgen Schleicher

FAS 631
Référence article : 00484979

Venez consulter notre site Internet sur www.jumo.fr.



More than **sensors + automation**

www.jumo.fr