

Comprendre les capteurs d'oxygène et pourquoi ne pas les changer tous en même temps

Paul Raymaekers
Traduction: Stéphane Acounis

18/10/2010

1) Qu'est-ce qu'un capteur d'oxygène

- la partie électrochimique (la cellule galvanique)
- la partie électrique (circuit imprimé avec compensation de température)
- résumé

2) Le capteur «parfait»

3) Le capteur «presque parfait» (capteur parfait avec une durée de vie limitée)

4) Les «vrais» capteurs et leur mode de défaillance

- type 1: limitation en courant
- type 2: mauvais lot
- type 3: mort soudaine, sortie trop élevée, sortie variable

5) Combinaison des modes de défaillance: l'inconnu?

6) Simulation sur plusieurs scénarios de remplacement de cellules: résultats

7) Recommandations générales sur l'utilisation des capteurs

8) Remarques

Avertissement

Certains graphiques de cette présentation ne sont montrés qu'à des fins didactiques et ne reflètent pas la réalité.

L'auteur n'est aucunement responsable de l'utilisation de ces données.

C'est l'utilisateur au final qui décide quelle règle il appliquera pour le remplacement des cellules de son recycleur.

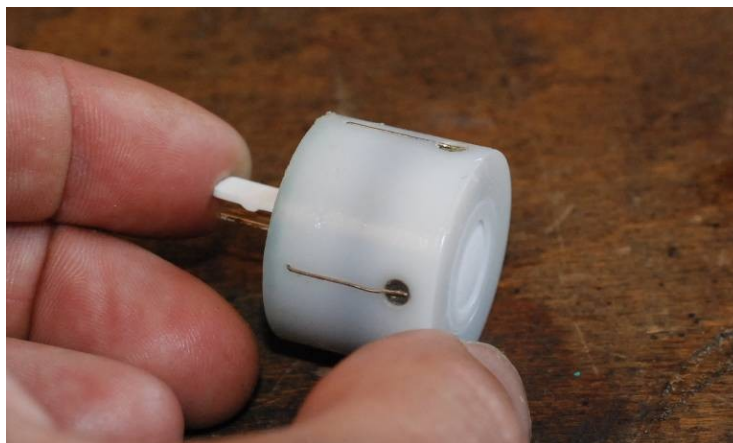
1) Qu'est-ce qu'un capteur d'oxygène?

Pour expliquer ce qu'est un capteur d'oxygène, comment il fonctionne, on va en démonter un et examiner comment il est constitué.

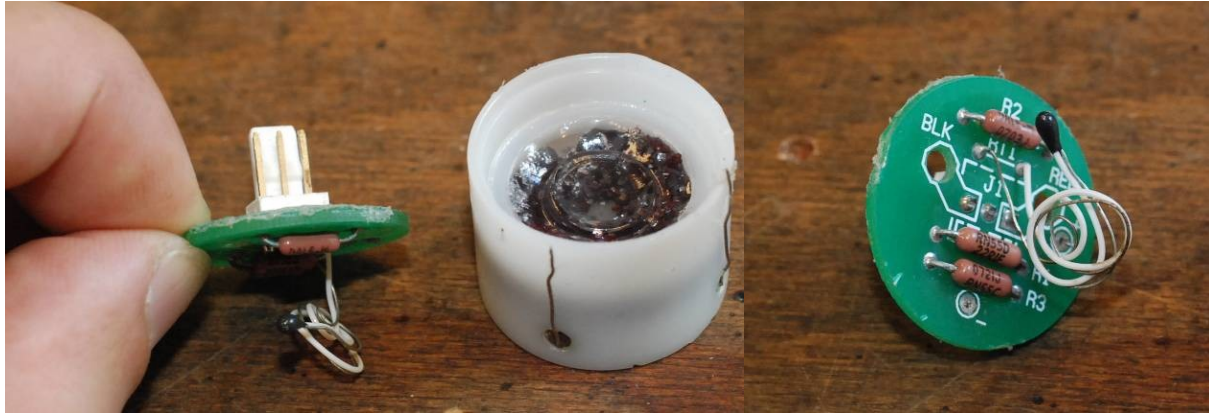
ATTENTION! Ne pas faire ces opérations vous-même, une cellule oxygène contient des liquides corrosifs qui peuvent brûler sévèrement votre peau. Il est fortement déconseillé de démonter un cellule oxygène.



Sur la gauche vous apercevez un capteur d'oxygène complet, sur la droite l'intérieur du capteur quand l'enveloppe de protection externe est enlevée. Sur le dessus de la partie interne on voit un circuit imprimé avec en son centre un connecteur (ici de type Molex mais il en existe d'autres types), la partie blanche en dessous étant le corps du capteur (la cellule galvanique) d'où sortent deux fils de connexion allant au circuit imprimé.



Sur la face inférieure du capteur on aperçoit une membrane blanche: c'est par là que l'oxygène passe.



Lorsque l'on enlève le circuit imprimé, on aperçoit des composants électroniques montés sur la partie inférieure. L'autre partie est la cellule galvanique ou partie électro-chimique composée d'une membrane transparente souple qui recouvre les électrodes baignant dans un liquide.

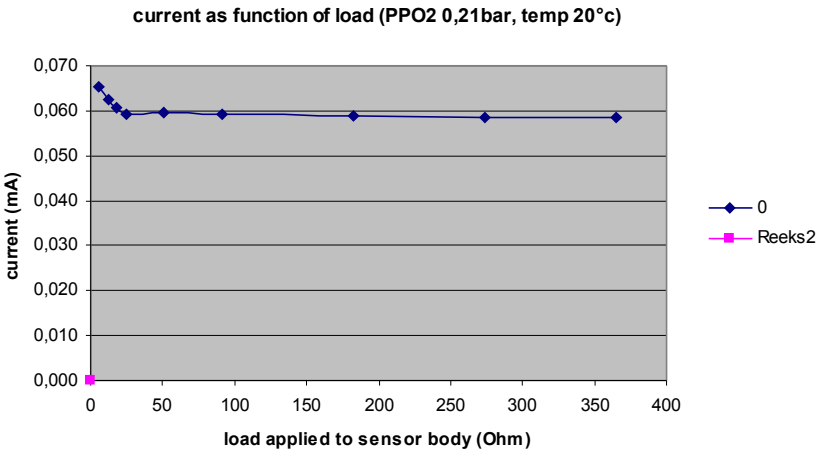
Analysons ces deux parties

a) La partie électrochimique du capteur (cellule galvanique)

Pour voir comment elle se comporte, on fera quelques mesures. Nous soumettrons la partie à 3 paramètres différents: PpO₂, température et charge électrique. Un seul paramètre variera et nous mesurerons le courant fourni.

A) Courant fourni par la cellule galvanique en fonction de la charge électrique à PpO₂ et température constantes (respectivement 0,21bar et 20°C)

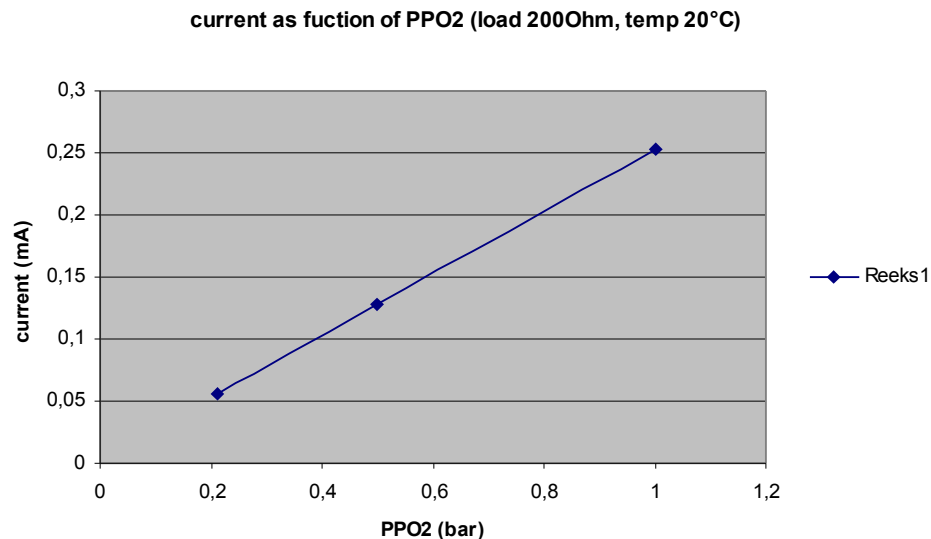
(pour charger électriquement la cellule galvanique nous connecterons une résistance entre les deux fils et nous mesurerons le courant la traversant)



Nous nous apercevons que même si nous changeons la charge (la résistance) sur une large échelle (de 20Ω à plus de 500Ω), le courant fourni ne change quasiment pas! Ce premier test montre qu'en fait la cellule galvanique est une source de courant (et non une source de

tension); cela veut dire qu'elle tente de délivrer un certain courant indépendant de la charge appliquée. Maintenant si nous appliquons la loi d'Ohm ($U=R \times I$), la tension que nous mesurerons aux bornes de la résistance de charge est directement linéaire avec le courant qui la traverse. Cela veut dire que la tension mesurée sera plus importante si nous augmentons la charge électrique totale (nous y reviendrons plus tard mais d'ores et déjà on peut voir d'où vient le terme «limité en courant»).

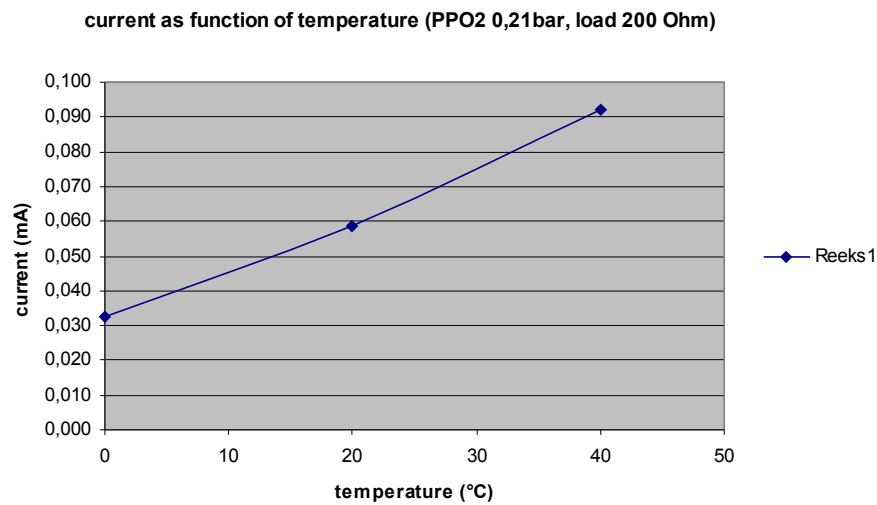
B) Courant fourni par la cellule galvanique en fonction de la P_{pO_2} à charge (200Ω) et température constantes ($20^\circ C$)



Nous remarquons que lorsque l'on augmente la pression partielle d'oxygène du gaz qui vient en contact de la membrane de la cellule, le courant fourni augmente et est linéaire: à une P_{pO_2} nulle, le courant lui aussi est nul!

Il devient alors clair qu'en chargeant électriquement une cellule avec une résistance, la tension mesurée aux bornes est directement proportionnelle à la P_{pO_2} du gaz mesuré.

C) Courant fourni en fonction de la température à charge (200Ω) et PpO_2 (0,21bar) constantes



Nous voyons que lorsque l'on augmente la température le courant fourni par la cellule augmente également. Par contre cette augmentation n'est pas linéaire. C'est typiquement un effet qu'on désire ne pas avoir sur un capteur mesurant la PpO_2 .

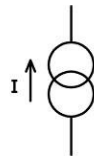
Conclusion:

L'analyse de la cellule galvanique (le corps du capteur) montre que c'est une source de courant, et non une source de tension, qui délivre un courant:

- relativement indépendant de la charge appliquée au capteur
- presque parfaitement proportionnel à la PpO_2 du gaz mesuré

mais qui est fortement influencé par la température. Donc, sans contrôle de la température ou compensation de son effet, nous ne pourrions utiliser ce capteur pour la mesure de la PpO_2 dans un environnement plongée.

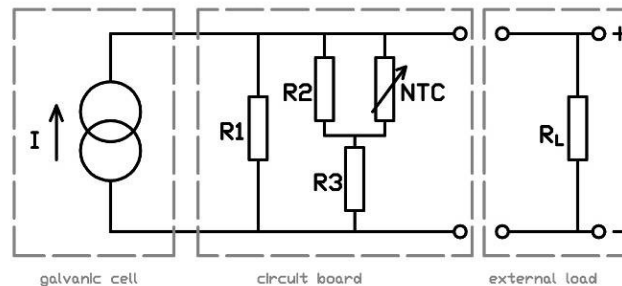
Note: le symbole de la source de courant est



b) Le circuit imprimé

En analysant le contenu du circuit imprimé, on trouve un réseau résistif composé de 3 résistances normales (R1, R2 et R3) et d'une résistance dépendant de la température ou thermistance. Cette thermistance voit sa valeur diminuer lorsque la température augmente, on l'appelle CTN (Coefficient de Température Négatif).

Le schéma de ce réseau résistif est celui-ci (certains capteurs peuvent avoir des circuits différents, nous utilisons cette organisation afin d'expliquer le principe de compensation):



À gauche nous avons la cellule galvanique (la source de courant), au milieu le réseau résistif que nous trouvons sur le circuit imprimé et sur la droite la charge résistive externe que le fabricant du capteur recommande de placer là où la mesure se fait.

Maintenant,

A: sans faire de calculs complexes, si vous regardez attentivement la partie centrale, les 3 résistances fixes et la CTN, vous comprendrez que quand la température augmente, la résistance totale (R) diminue puisque la valeur de la CTN diminue.

B: nous savons déjà que le courant fourni par la cellule galvanique (I) est indépendant de la charge résistive → faire varier cette charge ne fera pas varier le courant de sortie.

C: nous savons également que le courant fourni augmente avec la température.

D: suivant la loi d'Ohm, la tension en sortie du réseau résistif sera égale au produit du courant I par la résistance R.

Résultat: en choisissant judicieusement le réseau résistif, ici le réseau de compensation en température, la tension mesurée aux bornes restera constante quelque soit la variation de température si et seulement si l'augmentation du courant I est compensée par la diminution de la charge totale R de telle manière que le produit $I \times R$ reste constant (et tant que la PpO_2 ne change pas).

Notez que la charge totale R comprend le réseau résistif de compensation de température et la charge externe R_L .

Voici donc comment l'influence de la température dans un capteur d'oxygène est compensée: cela ne fonctionne que parce que le capteur lui-même est une source de courant et que la charge électrique est un réseau de résistances. La tension mesurée aux bornes de ce réseau est alors indépendante de la température.

Les valeurs typiques de ce réseau résistif sont de l'ordre d'une centaine d'ohms (de 100Ω à 200Ω).

Sur le schéma on remarque qu'il y a une résistance de charge externe (R_L) placée à l'extérieur du circuit, pourquoi?

Simplement parce que la mesure n'est pas effectuée juste à la sortie de la cellule mais à une distance non négligeable. Pour éviter toute influence externe sur ce câble (du bruit électronique), il est préférable d'avoir un courant qui y circule. La résistance R_L assure ce rôle. Sa valeur typique est de $10k\Omega$ (10000Ω).

Le réseau résistif interne est choisi de façon à assurer une compensation en température optimale si une charge externe est placée comme préconisé par le constructeur.

Le réseau interne faisant une centaine d'ohms, la charge externe une dizaine de milliers d'ohms, on comprend aisément que 98 à 99% du courant fourni par la cellule galvanique s'écoule dans le réseau interne et qu'une toute petite portion va dans la résistance externe.

Attention, un « mythe » va tomber:

Déconnecter la charge externe de la cellule ne va pas augmenter sa durée de vie puisque la majorité du courant s'écoule dans le réseau résistif interne. De toute façon, la cellule délivre du courant tant qu'il y a de l'oxygène.

Conclusion générale:

Un capteur d'oxygène est un assemblage d'une partie électrochimique (la source de courant ou cellule galvanique) et d'un circuit électronique (le réseau résistif de compensation de température) fait de telle manière à ce qu'on puisse mesurer une tension de sortie qui est parfaitement linéaire avec la PpO_2 . À condition qu'on y connecte une charge externe adéquate.

2) Le capteur «parfait»

Pour la suite de l'exposé, nous supposons que nous pouvons fabriquer un capteur parfait. Ce capteur fournirait la même tension, parfaitement linéaire et proportionnelle à la PpO_2 du gaz mesuré, indépendamment de la température et de l'humidité, ou de toute autre influence externe.

Cela voudrait dire qu'on aurait à le calibrer qu'une seule fois à l'installation et qu'on n'aurait jamais à le changer parce qu'il aurait une durée de vie infinie: la probabilité qu'il cesse de fonctionner à l'installation ou après un certain temps est nulle.

Combien de capteurs de ce type aurions nous besoin dans un recycleur? Théoriquement un, mais ...

Mais pour le moment, nous n'avons ni connecteurs parfaits, ni électronique de lecture parfaite, juste notre capteur parfait. Donc, pour s'apercevoir d'un dysfonctionnement il nous faut au moins un autre capteur avec si possible une chaîne de mesure indépendante et redondante. Une lecture différente nous indiquera alors que quelque chose ne va pas. Sur les systèmes automatiques il y aura 3 capteurs (c'est un autre chapitre ☺).

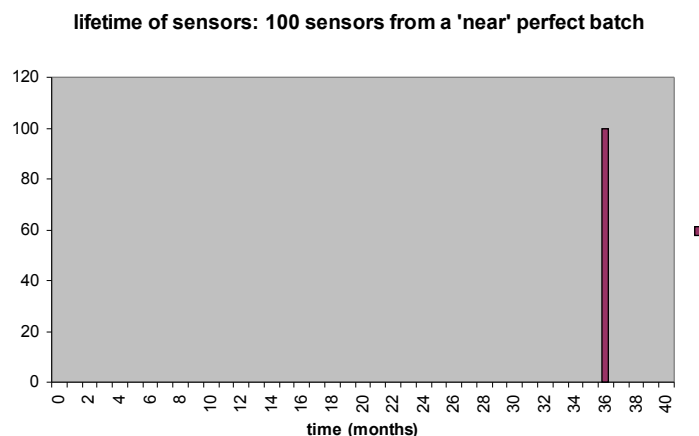
Malheureusement, nous n'avons pas encore trouvé de capteur parfait ...

3) Le capteur «presque» parfait

Définissons d'abord «presque» parfait: c'est un capteur parfait mais avec un inconvénient, sa durée de vie est limitée mais elle est parfaitement connue, disons 36 mois.

La fin de vie est définie comme le moment où le capteur n'est plus parfait: tension de sortie nulle, trop importante, instable, non linéaire, limitée, etc... Nous n'avons même pas à connaître son dysfonctionnement, nous savons juste qu'au bout de 36 mois notre capteur ne fonctionnera plus.

La probabilité de dysfonctionnement d'un capteur «presque» parfait peut être représentée comme ceci:



Le graphique représente les résultats d'un test sur un lot **imaginaire** de 100 capteurs et montre à quel âge le capteur cesse d'être parfait. Vous noterez qu'ils cessent de fonctionner 36 mois après production.

Supposons que nous ayons mis 3 cellules de ce lot «presque parfait». Quand allons nous devoir remplacer les capteurs (2, 3 ou plus) dans notre recycleur?

Nous savons qu'ils sont tous parfaits pendant 35 mois et qu'ils vont cesser de fonctionner d'une manière ou d'une autre au bout de 36 mois; dans ce cas, il suffit de les remplacer avant leur fin de vie par des capteurs neufs et nous pourrons plonger pendant ... 35 mois.

Simple non? Mais malheureusement ce capteur «presque parfait» n'existe pas ...
Alors passons aux capteurs «de la vraie vie»!

4) Les «vrais» capteurs et leur mode de défaillance

Nous allons maintenant aborder les différents modes de défaillance d'un «vrai» capteur d'oxygène, leurs causes, les conséquences et risques associés, la probabilité de défaillance en fonction de l'âge du capteur et la manière d'utiliser le capteur.

Nous définissons la défaillance d'un capteur comme étant la déviation de comportement par rapport à un capteur parfait pour une utilisation dans un recycleur: sortie linéaire pour une PpO_2 comprise entre 0,21 et 1,6bar, la valeur absolue ne variant pas plus que quelques pour cents sur une période de quelques jours et dans la plage de fonctionnement en tension de l'électronique connectée.

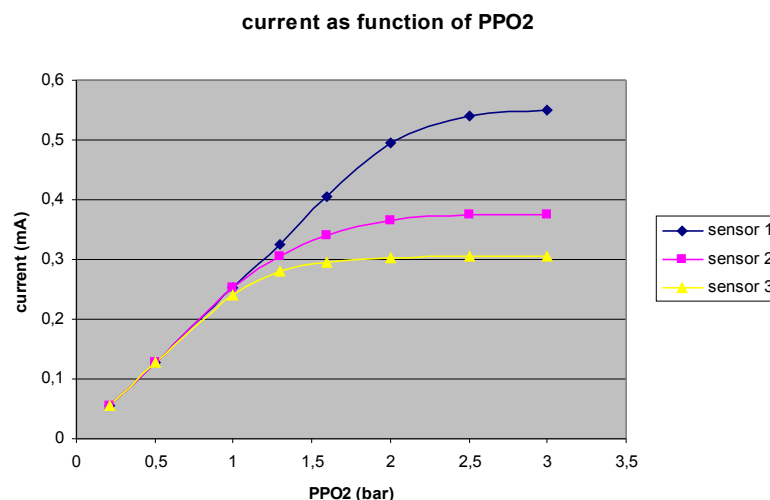
A) Défaillance de type 1: limitation en courant

Dans le [chapitre 1](#), nous avons vu que la cellule galvanique d'un capteur d' O_2 délivre un courant proportionnel et parfaitement linéaire à la PpO_2 .

Dans les tests nous l'avons mesuré qu'à une PpO_2 maximum de 1 bar.

Si nous continuons à tester avec des PpO_2 bien plus importantes nous verrons que cette linéarité est limitée: le courant n'augmente pas indéfiniment.

Le graphique suivant montre le courant en fonction de la PpO_2 pour 3 capteurs différents:



Pour le capteur n°1, nous voyons que le courant augmente linéairement jusqu'à une PpO₂ d'environ 2bar et que cette courbe commence alors à s'aplatir: la cellule galvanique ne peut plus fournir assez de courant. Nous parlons alors d'une limitation en courant du capteur, il y a une limite à ce que le capteur peut fournir.

En fait, chaque capteur, même celui qui sort de son sachet, est limité en courant. Mais comme nous utilisons le capteur seulement dans une plage de fonctionnement donnée (généralement moins de 1,6bar), nous ignorons son comportement hors de cette zone tant qu'il reste linéaire dans cette plage.

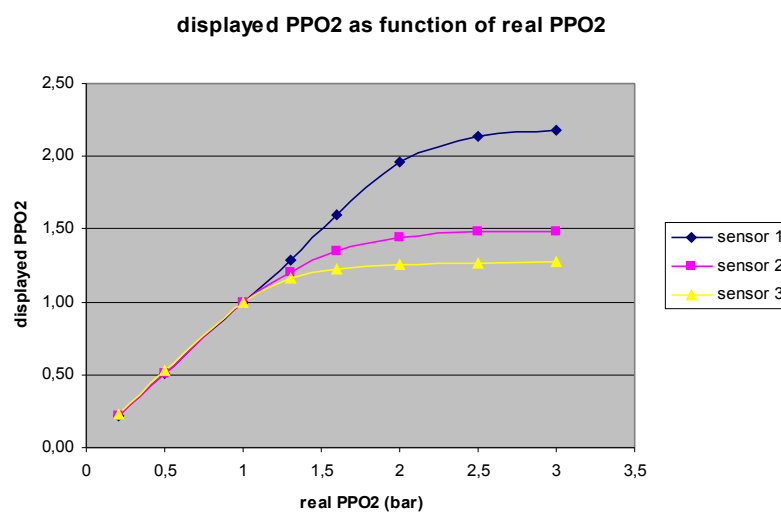
Pour une utilisation dans un recycleur, nous dirons donc qu'un capteur est limité en courant quand la courbe commence à s'aplatir en dessous de 1,6bar.

Cela veut dire que le capteur n°1 fonctionne parfaitement: il délivre une tension parfaitement linéaire à la PpO₂ (lorsque l'on calibre l'électronique de lecture à une PpO₂ de 1bar, nous savons qu'en lisant 1,3 la PpO₂ est effectivement à 1,3bar, ni plus, ni moins).

En résumé, tant que l'aplatissement de la courbe est en dehors de la plage de fonctionnement du capteur il n'y a aucun soucis à se faire.

Mais que se passe t-il quand un capteur devient limité en courant?

Pour faciliter les choses, regardons le graphe de la PpO₂ lue sur l'afficheur en fonction de la tension de sortie pour nos 3 capteurs:



Regardons le capteur n°2: nous remarquons que la sortie est linéaire jusqu'à une PpO₂ de 1bar. Supposons que l'on calibre à l'oxygène pur (au niveau de la mer) et qu'à tort nous croyons avoir un bon capteur: linéaire jusqu'à une PpO₂ d'au moins 1,6bar.

Quelle valeur aura donc la PpO₂ affichée à 1,3bar? Est-ce qu'elle sera 1,3 fois supérieure à 1bar lorsque l'on a calibré? Non, la valeur de sortie est inférieure et si vous regardez la courbe, le capteur indique $\pm 1,22$ bar. À la PpO₂ réelle de 1,6bar, le capteur nous indiquera $\pm 1,35$ bar.

L'afficheur nous indique une PpO₂ inférieure à la réalité ... pas très bon ça.

Mais regardons le capteur n°3.

Après calibration, notre afficheur indique une PpO_2 de 1bar, parfait. Mais à des PpO_2 plus importantes, il nous montre une valeur très éloignée de la réalité: à 1,3bar il indique 1,17, à 1,6bar il indique 1,23 et à une PpO_2 de 3bar il n'indique que 1,28 ...

Imaginons que nous plongeons et que vous vouliez augmenter le set-point pour atteindre 1,3bar. Vous (ou l'électronique de contrôle) injectez de l' O_2 pour augmenter la PpO_2 jusqu'à 1,3bar ... que vous n'atteindrez jamais! Peu importe ce que vous injectez, la valeur affichée n'atteindra jamais 1,3!

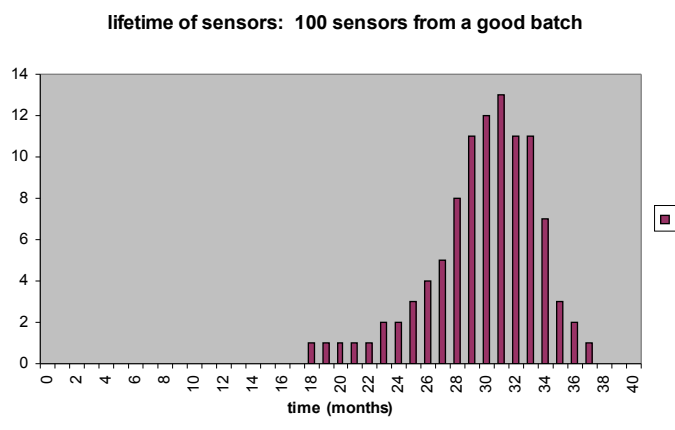
Voilà un réel danger à utiliser des capteurs limités en courant: ils mesurent une PpO_2 inférieure à la réalité et il est fort possible que le plongeur ne s'en aperçoive pas (même sur un recycleur électronique).

Heureusement nous utilisons plus d'un capteur dans un recycleur et le plongeur peut tester les capteurs et voir si ils sont limités en courant en injectant de l' O_2 à une profondeur connue (6-7m) et en vérifiant que les afficheurs indiquent au moins 1,6bar.

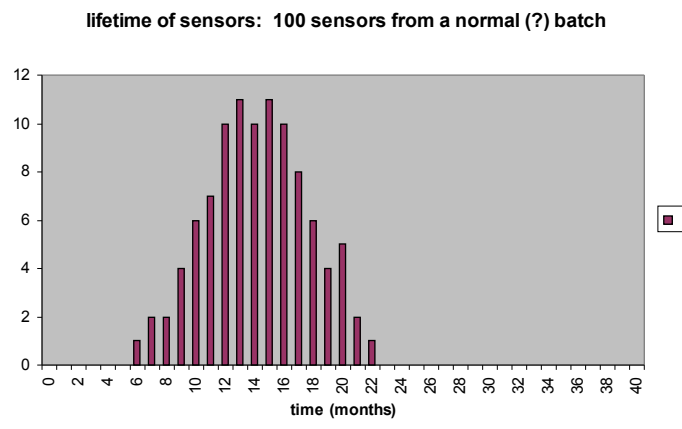
Mais pourquoi un capteur devient limité en courant? Et bien, quand le capteur a atteint un certain âge, lorsque son «carburant» est consommé, il ne peut plus délivrer autant de courant que nécessaire et se limite à un maximum. Et ce courant maximum diminuera encore plus avec l'âge.

Cela signifie que la limitation du courant semble plus se produire après que le capteur ait été utilisé pendant un certain temps, vers la fin de vie (théorique) d'un capteur, de sorte que la probabilité de défaillance augmente quand le capteur devient plus âgé.

D'expérience nous avons remarqué que la durée de vie moyenne dépend fortement du lot de production. Nous avons vu des lots où plus de 95% des capteurs dépassaient 24 mois de durée de vie (jusqu'à ce qu'ils deviennent limités en courant). C'est ce que nous appelons un bon lot.



Mais nous avons aussi vu des lots où on pouvait s'estimer heureux d'avoir une durée de vie moyenne de 12 mois! Un peu comme sur ce graphe...



Avec ce que nous savons, quand devons nous changer les capteurs dans notre recycleur? Ce n'est pas si clair que ça parce que nous ne savons pas à l'avance quel capteur va cesser de fonctionner. Cela dépend du lot de fabrication et surtout comment le capteur va être «traité»!

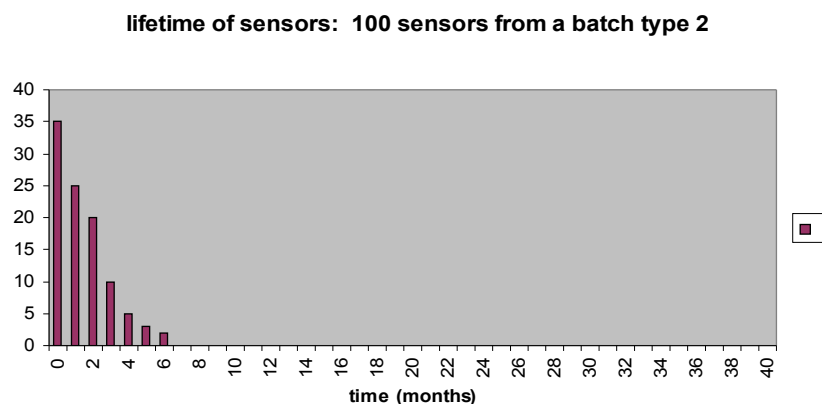
Non seulement la durée de vie du capteur (le moment où il devient limité en courant) dépend de la quantité de courant déjà délivré et de la quantité de carburant brûlé mais aussi de la température de stockage.

Au [chapitre 1](#) nous avons vu que le courant fourni par la cellule galvanique augmente avec la température; cela veut dire que le carburant utilisé augmente aussi avec la température (à 40°C, la consommation est doublée par rapport à 10°C).

Alors ne soyez pas étonné si les capteurs durent plus longtemps dans des pays froids ou tempérés.

B) Défaillance de type 2, le mauvais lot de fabrication

D'expérience nous avons remarqué que tous les capteurs ne se comportaient pas de manière normale jusqu'à leur fin de vie: ce graphe montre la durée de vie de quelques lots utilisés en 2006-2007.



Il montre clairement que nous avons à faire à un mauvais lot de fabrication, les capteurs commencent à cesser de fonctionner dès leur mise en service dans le recycleur sans raison apparente, mis à part quelques défauts internes?

Ou peut être que le lot de capteur n'est pas destiné à une utilisation en plongée mais seulement pour une utilisation à 1bar de sorte que les multiples pressurisations du capteur lors des plongées ont une influence dramatique sur leur durée de vie?

C) Défaillance de type 3: autres cas

Voici une liste de quelques types de défaillances communes; il ne semble pas y avoir de relation directe entre l'âge du capteur et la probabilité de défaillance, le graphe serait de hauteur constante en fonction du temps.

Mort soudaine

Un type de défaillance que nous voyons sur les capteurs d'oxygène est une soudaine chute de la tension de sortie à (presque) zéro volts. Cette défaillance n'est pas due à un manque de «carburant» (que l'on peut prédire). Elle peut être de plusieurs causes: rupture mécanique, rupture de connexions, un défaut sur le circuit imprimé, corrosion, un trou dans la membrane qui retient le liquide «carburant», chute du capteur depuis une certaine hauteur, etc...

Sortie de forte valeur

Quelquefois un capteur délivre une tension de sortie bien trop supérieure à la normale, parfois 5 ou 10 fois plus! Selon un constructeur de capteurs cela peut être dû à de petits trous dans la membrane hydrophobe placée sur la face active de la cellule de sorte qu'une quantité plus élevée d'oxygène est utilisée dans la réaction chimique.

Sortie à valeur changeante

Quand la tension de sortie varie si vite qu'on ne peut pas avoir une lecture stable assez longtemps après calibration, du moins pour terminer la plongée.

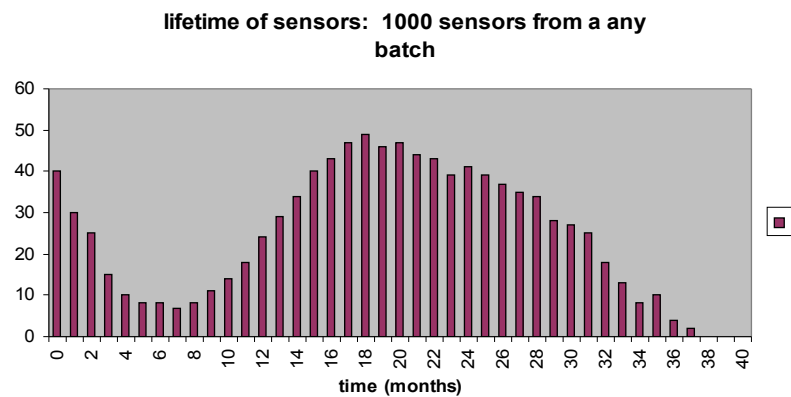
Il ressort clairement que les défaillances de [type 2](#) et 3 se produisent moins souvent que celles de [type 1](#) (défaillances sur un bon lot où la durée de vie moyenne du capteur dépasse les 24 mois).

5) Combinaison des modes de défaillance: l'inconnu

Après tous les types de défaillances que nous avons vu au [chapitre 4](#), il apparait clairement qu'il n'est pas si aisé de prédire la durée de vie d'un capteur car nous ne connaissons pas la qualité du lot de fabrication: est ce que ce sera plus du [type 1](#) ou aurons nous moins de chance avec du [type 2](#), ou ... ?

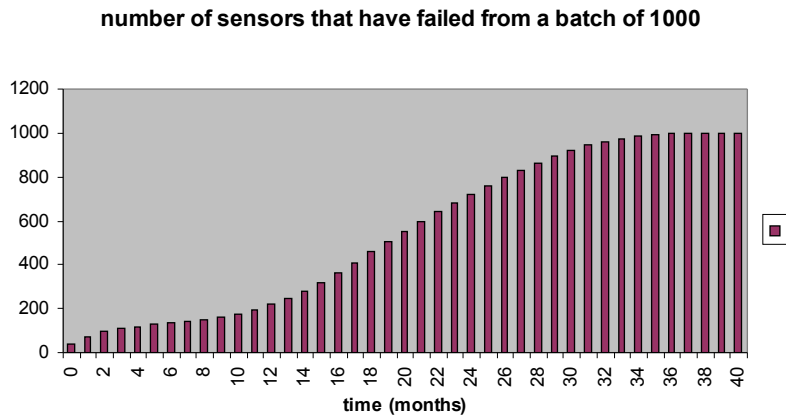
Tout ce que nous pouvons faire c'est estimer le comportement du capteur en fonction de nos connaissances.

À cet instant, notre meilleure estimation de la durée de vie d'un capteur ressemble à ceci:



Vous voyez sur la partie gauche de la courbe la plus grande probabilité de défaillance d'un capteur après installation ([type 2](#)) et plus à droite la décroissance typique due à l'âge ([type 1](#)).

Cette courbe peut aussi être représentée d'une autre manière: le résultat cumulatif.



Ce type de graphe montre le nombre de cellules qui ont cessé de fonctionner en fonction de l'âge dans un lot de 1000.

C'est ce graphe que nous utiliserons plus tard en simulation numérique lorsque nous voudrons estimer la durée de vie d'un capteur: à chaque installation de cellule dans le recycleur, nous laisserons l'ordinateur choisir une valeur aléatoire entre 1 et 1000 et en fonction de cette courbe nous obtiendrons une estimation de durée de vie pour ce capteur.

6) Simulation sur plusieurs scénarios de remplacement de capteurs

Maintenant que nous avons une idée sur la défaillance des capteurs, nous pourrions trouver quelle serait la meilleure règle d'utilisation dans un recycleur, quand les changer, combien en utiliser, etc...

Définir ce qu'est une bonne règle implique aussi définir quel résultat nous aimerions avoir ou quel résultat nous ne voulons surtout pas avoir.

Nous acceptons tous qu'un capteur puisse cesser de fonctionner pendant une plongée: avec une redondance suffisante ce n'est pas un problème.

Il est clair qu'avoir tous ses capteurs défaillants pendant la même plongée est le pire qui puisse arriver spécialement si ils s'arrêtent de fonctionner de la même manière, sans moyen de s'en apercevoir. Alors quelle que soit la règle de changement des capteurs que nous utiliserions, ce résultat ne doit jamais arriver.

La pire situation suivante est la défaillance de la majorité des capteurs dans votre recycleur pendant la même plongée; à fortiori dans un recycleur automatique là où l'ordinateur va utiliser une logique de vote pour déterminer parmi les valeurs différentes celles qu'il utilisera. De cette manière la perte de 2 cellules sur 3 est pire que la perte de 2 cellules sur 4 ou de 2 sur 5 (une défaillance de 2 sur 3 est pire qu'une défaillance de 3 sur 5 mais comme nous le verrons plus tard, cet évènement n'arrive que très rarement alors qu'une défaillance de 2 cellules sur 3 est une chose à envisager sérieusement).

Les différentes règles de changement de cellule que nous allons tester (simuler):

- **P1:** la règle standard et largement répandue, 3 cellules dans le recycleur et changement annuel de tous les capteurs. On commence une nouvelle saison de plongée avec des cellules neuves. Cette règle sera aussi simulée avec 4 et 5 capteurs.

Notez cependant, qu'en mettant 3 nouvelles cellules dans le recycleur en même temps, la probabilité de défaillance ne sera pas donnée par le graphe de «meilleure prévision» (qui rappelons-le est une représentation des défaillances possibles avec utilisation de capteurs de lots différents) mais par un graphe de défaillance type 1, 2 ou 3 car dans ce cas tous les capteurs proviennent d'un même lot de fabrication. Vous noterez que la distribution dans le temps est beaucoup plus concentrée à des moments spécifiques ce qui donne une plus grande probabilité de défaillance en même temps.

Et plus encore, avoir des capteurs ayant le même historique de plongées augmente la probabilité d'une défaillance groupée à un moment donné (hors champs de cette simulation).

- **P2:** le cas opposé de la règle précédente, 3, 4 ou 5 cellules dans le recycleur que l'on change unitairement lorsqu'un capteur meure pendant la plongée précédente.
- **P3:** la règle que **rEvo** préconise depuis quelques temps, «la rotation des cellules». Le système fonctionne comme ceci: dès que la plus jeune des cellules dans le recycleur atteint l'âge de 6 mois, vous remplacez la plus faible (celle qui réagit plus lentement aux changement de PpO₂ ou bien celle qui semble être atteinte d'une limitation en

courant lors du test à 6m). Si vous ne trouvez pas de cellule faible, changez alors la plus vieille. Bien entendu, si un capteur meurt avant que la plus jeune cellule n'atteigne 6 mois, vous la remplacez et elle devient alors la plus jeune.

Nous avons désormais nos différents scénarios en utilisant 3,4 ou 5 capteurs dans notre machine. Nous pouvons demander à plusieurs plongeurs d'aller plonger, de remplacer les capteurs en fonction du scénario adopté et de nous donner le résultat. Pour avoir un résultat significatif, cela prendrait ... quelques millions de plongées!

Fort heureusement nous avons un ordinateur qui va se charger de simuler les scénarios. Comment cela fonctionne t-il?

Pour chaque scénario, et pour chaque quantité de capteurs dans la machine, nous allons demander à l'ordinateur de faire 1 million de plongées à la suite. Nous ferons une plongée par semaine et allons plonger toute l'année. Nous commencerons avec des cellules neuves et à chaque fois qu'un nouveau capteur est mis dans la machine (soit au début, soit parce qu'il meurt ou soit parce qu'il est temps de le remplacer en fonction de notre règle), l'ordinateur va prédire une durée de vie du capteur aléatoirement et en utilisant un graphe de résultat cumulatif de défaillance (pour la [règle P1](#), sur une prévision de vie choisie au hasard du type de défaillance unique pour les 3 capteurs, pour les autres règles sur le graphique représentant plusieurs lots).

En sortie de simulation, nous allons enregistrer combien de fois un ou plusieurs capteurs cesse de fonctionner **pendant une plongée**. En outre, le nombre total de capteurs nécessaires à ce million de plongées sera aussi enregistré (cela nous permettra de calculer le nombre moyen de capteurs utilisés par année, ceci pour chaque règle de remplacement).

Ce tableau représente le résultat de la simulation par ordinateur d'un million de plongées:

	Cellules utilisées	Nombre total de cellules utilisées	1 panne	2 pannes	3 pannes	4 pannes	5 pannes	Cellules utilisées par an
Règle P1	3	73301	14542	524	7			3,81
	4	97936	18994	937	48	1		5,09
	5	121962	22448	1531	98	2	0	6,34
Règle P2	3	39527	38499	511	2			2,06
	4	52733	50560	1070	11	0		2,74
	5	65816	62257	1745	23	0	0	3,42
Règle P3	3	49627	23106	152	0			2,58
	4	59098	38140	527	4	0		3,07
	5	70205	52958	1095	6	1	0	3,65

La première colonne indique le nombre de cellules utilisées dans le recycleur.

La seconde colonne indique le nombre total de cellules utilisées sur ce million de plongées en fonction de la règle de remplacement.

Les 5 colonnes suivantes indiquent la fréquence de survenue de défaillance d'une, deux ou plus de cellules pendant une plongée (toujours sur un million de plongées). Par exemple, on s'aperçoit que quelque soit le scénario, 5 cellules ne peuvent cesser de fonctionner en même temps.

La dernière colonne indique le nombre moyen de cellules utilisées par année de plongée par scénario de remplacement: il ressort clairement que si vous utilisez 5 cellules et que vous les changez toutes à la fin de l'année, vous utiliserez le nombre maximum de cellules. Même chose, si vous utilisez 3 cellules et que vous ne remplaciez que celle en panne, vous utiliseriez aussi un petit nombre de cellules par an ... mais ça ne serait probablement pas très sécurisant ☹.

En regardant attentivement le tableau, vous noterez que:

- quelle que soit la règle utilisée, une défaillance de tous vos capteurs est extrêmement rare et qu'en choisissant judicieusement cette règle, elle devient nulle. (gardez en mémoire que ce n'est pas vrai lorsque vous faites par exemple une plongée tous les trois mois parce que dans ce cas vous accumulerez les défaillances possibles et ainsi les probabilités que plusieurs capteurs défailent en même temps). Un autre exemple: si vous utilisez la [règle P2](#) de remplacement des cellules et que vous ne plongez pas pendant 5 ans, vous savez à coup sûr que les capteurs vont tous cesser de fonctionner en même temps lors de la plongée. Mais cela ne veut pas dire non plus que vous ne puissiez pas perdre la lecture des cellules pour d'autres raisons: noyade complète, défaillance de l'électronique, etc...
- Plus vous avez de capteurs dans votre recycleur, moins il y a de risque que la majorité des cellules soient défaillantes: par exemple, il y a toujours beaucoup plus de risque que 2 capteurs sur 3 cessent de fonctionner comparé à 3 sur 4 ou 3 sur 5, ceci quelle que soit la règle de changement utilisée.
- Pour le même nombre de capteurs, plus vous variez dans votre règle de remplacement, moins vous utiliserez de cellule par an.
- En choisissant correctement la règle de remplacement, vous pouvez réduire le risque de défaillance simultanée de plusieurs capteurs tout en en utilisant moins par an et ceci

en ayant plus de cellules dans votre machine: par exemple, avec la [règle P1](#), en utilisant 3 cellules, le risque est bien plus élevé de perdre 2 cellules sur 3 comparé à la [règle P1](#) avec 5 capteurs d'en perdre 3 sur 5 (mais avec cette règle, on utilise moins de capteurs par an).

7) **Recommandations générales sur l'utilisation des capteurs**

Premièrement, nous avons pour l'instant étudié la défaillance des capteurs et non de l'électronique associée. Il est clair que, quel que soit le nombre de capteurs utilisés, quelle que soit la règle de remplacement, si vous connectez les capteurs à la même électronique de lecture et si cette électronique ne fonctionne plus, tous vos capteurs deviendront inutiles ...

Recommandation n°1

Si vous le pouvez, connectez vos capteurs à des électroniques différentes afin d'établir une redondance, ainsi la probabilité de les perdre due à une défaillance de cette électronique diminue.

Recommandation n°2

Vérifiez régulièrement la limitation en courant de vos capteurs: ce type de défaillance peut être détecté avant que ça ne devienne problématique. Un capteur limité à 1,55bar peut tout de même fonctionner à 1,3bar mais il faudra le remplacer avant que la limitation ne devienne plus importante.

Recommandation n°3

Si un capteur fonctionne correctement, même si il est vieux, il vaut mieux le garder en tant que capteur redondant plutôt que de le jeter (pourquoi donc jeter un capteur valide?). Utilisez le maximum de capteurs que votre recycleur accepte de telle sorte qu'en ayant suffisamment vous ayez une **réelle** redondance.

Cela nous amène, en fonction du type de recycleur, aux recommandations suivantes:

Recommandation n°4 (recycleur contenant au maximum 3 cellules)

- e/hCCR: **ne jamais remplacer vos capteurs en même temps**. Si vous remplacez vos cellules en même temps, il est clair qu'il y a une possibilité de défaillance de deux capteurs en même temps

La [règle P3](#) rend le système plus sûr. Même si vous pensez qu'une cellule ne doit pas dépasser 12 mois d'utilisation, appliquez la [règle P1](#) et installez une nouvelle cellule tous les 4 mois: cela diminuera un peu la probabilité de défaillance de deux capteurs sur trois mais par contre cela augmentera la consommation de cellules sur une année.

- mCCR: la probabilité de détection d'une double défaillance par l'utilisateur est plus importante que sur un eCCR; dans ce cas il n'y a aucune raison de ne pas utiliser la [règle P3](#).

Recommandation n°5 (recycleurs contenant au moins 4 cellules et 2 électroniques redondantes)

- indépendamment du type de machine (mCCR ou e/hCCR), utiliser 4 cellules ou plus et la [règle de remplacement P3](#) se traduit toujours par une probabilité plus importante d'avoir au moins deux bonnes cellules comparé aux 3 cellules et une [règle P1](#) (3CP1). Avec l'avantage supplémentaire d'utiliser moins de cellules par an.

Même avec 5 cellules et la [règle P3](#) vous consommerez moins de cellules par an et aurez plus de bonnes cellules qu'avec une [règle P1](#) et 3 cellules.

En ayant 5 cellules, vous pourriez opter pour la [règle P2](#) (remplacer les cellules au fur et à mesure de leur défaillance). Mais comme cela ne donne qu'une baisse marginale de la consommation, il n'y a aucune raison de ne pas appliquer la [règle P3](#).

Pour les recycleurs ayant 4 ou 5 cellules:

- mCCR: commencez avec 3 cellules sur deux électroniques différentes et ajoutez des cellules selon la [règle P3](#) en jetant les plus anciennes, à moins que vous n'ayez clairement identifié une cellule défaillante (réponse plus lente, non linéaire, etc...) durant les précédentes plongées.
- e/hCCR: même chose qu'un mCCR mais en démarrant avec 4 cellules (3 cellules sont nécessaires pour la logique de vote et au moins une cellule pour l'électronique redondante – afficheur ou HUD).

Finalement, pour réduire les risques de défaillances multiples lorsque l'on met en route le recycleur avec des cellules provenant d'un même lot (on a souvent pas d'autre choix), il est judicieux de rajouter une cellule au bout de 3 ou 4 mois puis de remplacer une cellule tous les 6 mois.

Utiliser 5 cellules a un autre avantage: lorsqu'une cellule meurt, vous avez le temps d'en acheter une. Vous n'avez pas besoin d'en stocker ce qui vous fait n'utiliser que des cellules neuves (nous avons vu qu'utiliser un recycleur équipé de 4 cellules est une meilleure alternative à un recycleur équipé de 3 cellules changées selon la [règle P1](#)).

Recommandation n°7

Il a été montré qu'une cellule délivre un courant plus élevé lorsque la température est élevée. Si vous le pouvez, stockez votre recycleur dans une pièce tempérée. Cependant, il est déconseillé d'enlever les cellules après la plongée et de les stocker séparément au frais: la probabilité d'une défaillance mécanique augmente fortement car les connecteurs n'ont qu'un nombre limité d'insertion.

Recommandation n°8

Lorsque vous installez une nouvelle cellule dans votre recycleur, notez y la date de manière à savoir laquelle est la plus jeune. Dans notre étude, nous avons supposé que la durée de vie de la cellule commençait lorsqu'on la sortait de son sachet hermétique. Cela semble être le cas si la date de fabrication est inférieure à un an.

Cette date de fabrication est indiquée de façon codée sur la cellule, généralement de deux manières différentes;

- 3 chiffres avec le premier indiquant l'année de fabrication et les deux autres le mois. Exemple: 805xxx indiquant l'année 2008 et le cinquième mois (mai).
- Une lettre suivie d'un nombre, la lettre codant le mois (A=janvier, B=février, etc...) et le nombre le mois. Exemple: A8 janvier 2008

8) Remarques

On pourrait penser que les résultats du [tableau 1](#) (plusieurs capteurs tombant en panne en même temps) semblent faibles, c'est vrai. En réalité, il se peut que plusieurs événements se produisent plus souvent mais ce n'est pas dû au seul capteur mais à d'autres facteurs qui ont influencé tous les capteurs au même moment ou bien à l'électronique associée.

De tels événements vont même forcer les capteurs à réagir de la même manière et par là même augmenter la probabilité de défaillance simultanée des capteurs lorsqu'ils ont le même âge et encore plus le même historique de plongée.

Par exemple, si vous avez complètement noyé le recycleur, et si vous pensez que vous pouvez encore utiliser les cellules après un bon rinçage, il y a une possibilité plus importante que plusieurs capteurs défaillent en même temps lors des plongées suivantes et ceci indépendamment de la règle de remplacement des cellules.

De même, pour une électronique non redondante ou un câblage non redondant, cela peut amener à une défaillance de lecture mais cela n'a aucun lien avec la manière dont on remplace les cellules.

Voilà pourquoi il est préférable d'avoir une électronique redondante. Sinon de bonnes cellules et une bonne règle de remplacement n'auront aucun effet avec une électronique de lecture mal conçue.

On pourrait aussi penser que la courbe de probabilité de défaillance d'un capteur n'est pas exactement connue et peut à tout moment changer: par exemple des capteurs différents ou meilleurs apparaissent sur le marché. C'est encore vrai et c'est pour cela qu'une simulation a été faite avec des paramètres représentant de manière plus juste les lots de fabrication. Le résultat de cette simulation débouche sur les mêmes recommandations voire plus: plus les lots de fabrication s'améliorent (un peu comme la courbe de défaillance d'un bon lot de type 1) plus la [règle P3](#) est pertinente par rapport à la [règle P1](#).

Un autre argument est que les gens ne plongent pas régulièrement ni ne changent les cellules toujours de la même manière: il arrive quelquefois que toutes les cellules sont changées en même temps par exemple lorsque l'on vend sa machine ou quand on l'expédie en révision chez le constructeur. Pour prendre ces paramètres en compte, plusieurs simulations ont été conduites avec un remplacement complet des capteurs suivant différentes périodicités: au bout de 5 ans et 8 ans. Là encore le résultat ne change pas, même recommandations qu'au [chapitre 7](#).

Et donc, pourquoi ne pas utiliser plus de 5 capteurs? 6, 7, voir plus ... Il semblerait que cela ne soit pas nécessaire tant que vous pouvez répartir les cellules sur différentes électroniques, la probabilité de défaillance simultanée de deux cellules étant somme toute assez faible. Par contre la consommation de cellules par an va augmenter. Et dans la plupart des cas, en remplaçant tous les 6 mois une cellule dans un recycleur en comptant plus de 5, vous manquerez de place avant de pouvoir remplacer la cellule la plus vieille.

Pour finir, souvenez vous qu'une cellule est prévue pour fonctionner à une atmosphère. Elle n'a pas été conçue pour être constamment pressurisée et dépressurisée. On ne connaît pas pour le moment l'influence de cette utilisation, mais on pense que la pressurisation/dépressurisation provoque des contraintes mécaniques sur les différentes parties du capteur ce qui diminuerait leur durée de vie. Encore une raison de plus pour avoir des cellules ayant un passé différent dans votre recycleur.