



HAL
open science

Conception et réalisation d'un respiromètre différentiel

Patrice Reling, Eric Pietri, Barbara Gouble

► **To cite this version:**

Patrice Reling, Eric Pietri, Barbara Gouble. Conception et réalisation d'un respiromètre différentiel. Cahier des Techniques de l'INRA, 2012, 77, 11 p. hal-02648283

HAL Id: hal-02648283

<https://hal.inrae.fr/hal-02648283v1>

Submitted on 29 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - ShareAlike 4.0 International License

Conception et réalisation d'un respiromètre différentiel

Patrice Reling^{1,2,3}, Eric Piétri^{1,2}, Barbara Gouble^{1,2}

Résumé. Afin d'optimiser les atmosphères de conservation des végétaux (4^e gamme par exemple), la connaissance des données respiratoires en fonction des atmosphères et de la température de stockage est indispensable. L'UMR408 Sécurité et Qualité des Produits d'Origine Végétale a mis au point un appareil permettant de mesurer les activités respiratoires des fruits et légumes dans l'air ou dans des mélanges ternaires (N₂, O₂, CO₂) tout en maintenant ce végétal dans les conditions gazeuses prédéfinies, donc sans limite de temps (hors durée de vie du végétal). Le respiromètre permet également de mesurer l'effet de la pression partielle en O₂ sur l'intensité respiratoire des fruits et légumes et de calculer le Km apparent.

Mots clés : végétal, respiration, capteur, débitmètre, régulation, atmosphère contrôlée, oxygène, dioxyde de carbone

Introduction

Si l'abaissement rapide de la température des fruits et légumes après la récolte est le moyen le plus efficace pour ralentir leur métabolisme, l'ajout d'une atmosphère spécifique permet d'accentuer le processus et de conserver des végétaux à un stade de maturité plus avancé et/ou de prolonger les délais de stockage et de commercialisation. Une atmosphère enrichie en CO₂ et appauvrie en O₂ ralentit notablement le métabolisme général des végétaux et retarde ainsi leur sénescence par le ralentissement des activités respiratoires, de la synthèse de l'éthylène (hormone de maturation), de l'apparition des brunissements enzymatiques (tâches brunes des coupes et nervures des salades préparées) et par l'inhibition du développement des micro-organismes aérobies (bactéries, levures, moisissures). En contre partie, une atmosphère trop riche en CO₂ et/ou trop pauvre en O₂ peut induire l'apparition d'un métabolisme anaérobie (de type fermentaire) ou des altérations liées à la phytotoxicité du CO₂ (échaudure, tâche, altération du goût).

Le stockage sous Atmosphère Contrôlée (AC) est pratiqué depuis de nombreuses années (conservation longue durée des pommes et poires par exemple). Le développement de l'Emballage sous Atmosphère Modifiée (EAM) des fruits et légumes frais entiers ou découpés est plus récent (développement de la salade 4^e gamme depuis les années 90) et nécessite une connaissance accrue du métabolisme des végétaux. En effet, l'EAM est un équilibre entre la physiologie du végétal (température et atmosphère optimales, activité respiratoire) et les caractéristiques du film d'emballage (perméance, microperforations), l'atmosphère créée résultant de la consommation d'O₂, de la production de CO₂ et des échanges (entrée/sortie) à travers le film. La connaissance des paramètres respiratoires du végétal et leur évolution au cours du temps sont donc primordiales pour choisir l'emballage afin d'obtenir l'atmosphère de conservation idéale (Varoquaux et al., 2002).

¹ INRA, UMR408 Sécurité et Qualité des Produits d'Origine Végétale, F-84000 Avignon, France

² Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, UMR Sécurité et Qualité des Produits d'Origine Végétale, F-84000 Avignon, France.

³ Correspondant : patrice.reling@avignon.inra.fr

Pour mesurer la respiration, la méthode la plus simple est le confinement en bocal avec un suivi de l'atmosphère du bocal par chromatographie en phase gazeuse (Chambroy et al., 1995). Cependant, cette méthode ne permet pas des mesures en continu car une accumulation du CO_2 et une diminution de l' O_2 ont des effets inhibiteurs sur la respiration des végétaux. De plus, elle est délicate à mettre en œuvre pour des atmosphères autres que l'air. Le respiromètre mis au point à l'UMR408 SQPOV répond à ces attentes (mesure en continu sur de longues durées, possibilité d'utiliser des atmosphères autres que l'air) et nous permet de mesurer les activités respiratoires (consommation d'oxygène (IR_{O_2}), production de CO_2 (IR_{CO_2}), quotient respiratoire (QR)) sur des temps beaucoup plus longs, tout en régulant l'atmosphère de conservation choisie. Il permet également d'estimer le K_m apparent (constante de Michaelis Menten) de la respiration, c'est à dire la concentration en O_2 pour laquelle l'intensité respiratoire maximale du produit est divisée par deux. Ce paramètre permet de savoir si un abaissement de la teneur en O_2 de l'atmosphère de conservation aura ou non un impact sur la physiologie et donc sur la conservation du végétal.

La configuration actuelle de l'appareil est un double respiromètre dans une enceinte thermostatée, qui nous permet, à une température donnée, une détermination en double d'un des paramètres respiratoires ou une mesure de deux paramètres ou conditions en parallèle (exemple : 1 IR et 1 K_m ou deux atmosphères différentes).

1. Principe

La **Figure 1** présente un schéma fonctionnel du respiromètre.

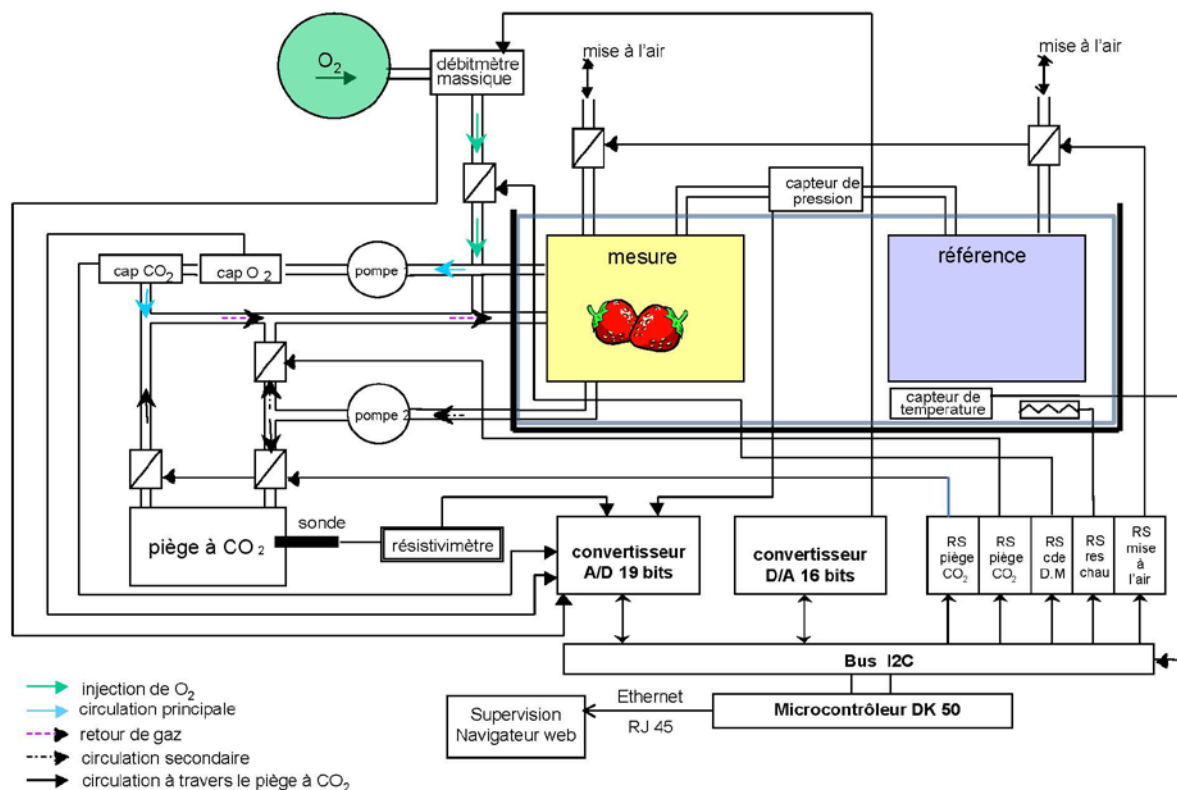


Figure 1. Schéma du respiromètre.

Contrairement à une simple mesure de l'atmosphère et une régulation par balayage gazeux dans une enceinte unique, notre système est basé sur une différence de pressions partielles (via un capteur de pression) entre deux enceintes initialement mises à l'équilibre. Lorsqu'ils respirent, les végétaux consomment de l'oxygène (O_2) et dégagent du dioxyde de carbone (CO_2). La composition de l'atmosphère qui est mesurée en continu varie. Lorsque la pression

partielle en dioxyde de carbone augmente au dessus de la valeur de consigne, le flux gazeux est dirigé vers un piège à CO₂ contenant de la soude jusqu'à ce que la pression partielle initiale en CO₂ soit restaurée.

L'élimination du CO₂ excédentaire, associée à la consommation d'O₂, crée une dépression dans l'enceinte de mesure (où se trouve le végétal) par rapport à l'enceinte de référence. La pression entre les deux enceintes est rééquilibrée en injectant de l'oxygène dont le débit est mesuré à l'aide d'un débitmètre massique (configuration normale de l'appareil avec atmosphère stable) ou de l'azote pour la mesure du Km apparent avec diminution progressive de l'O₂.

Ce système permet une régulation en continu, avec des fluctuations faibles de l'atmosphère qui n'influencent pas l'activité respiratoire. La régulation est fine (de l'ordre de 0,1 %), économique en gaz (pas de balayage), respectueuse du végétal (pas d'assèchement dû au balayage) et plus réactive (volumes impliqués faibles). Pour s'affranchir des variations entre pression et volume liées aux fluctuations de température (loi des gaz parfaits), les enceintes sont immergées dans un bain thermostaté : les variations de pression ne proviennent donc que du métabolisme des végétaux.

2. Descriptif

Le respiromètre est un assemblage judicieux et optimal de nombreux éléments, piloté par un microcontrôleur. Il est le fruit de nombreuses années de développement et d'expérience. La récente évolution de l'électronique, la baisse des coûts de conception et d'entretien ont permis une numérisation du système et permettent d'obtenir des résultats fiables et précis. L'appareil est un double respiromètre qui permet une répétition simultanée d'une condition ou un fonctionnement avec deux conditions d'atmosphère, pour une température donnée (**Figure 2**).



Figure 2. Le double respiromètre.

Les enceintes : en acier inoxydable, elles sont étanches et de volume identique (6,5 L). La première sert de référence ; la seconde est l'enceinte de mesure qui contient le végétal (fruits, légumes).

Le bain thermostaté : en fonctionnement, les deux enceintes sont entièrement immergées dans un bain thermostaté (200 L d'eau régulée à $\pm 0,1^\circ\text{C}$) ; cela permet de s'affranchir des modifications de pression relatives aux oscillations de température même minimales. La régulation est assurée par une résistance de 500 W, pilotée par le système : capteur numérique Max6633 (12Bits I2C).

La pompe : multi-têtes, Walton-Marlow, réf 313, 50 rpm. Une double circulation en circuit fermé homogénéise l'atmosphère de la cellule de mesure en permanence et permet la lecture en continu des pressions partielles O_2 et CO_2 . Une dérivation du circuit permet la régulation du CO_2 par l'intermédiaire du piège à soude.

Le capteur O_2 : Servomex Compagny Inc, réf 01155B000. C'est un capteur paramagnétique, il nous renseigne sur la teneur en oxygène de l'enceinte de mesure. Sa tension entre 0 et 1 volt correspond à un taux d'oxygène de 0 à 100 % à 0,1 % absolu.

Le capteur CO_2 : Servomex Compagny Inc, réf 1511/922 (0-25 % à 0,1% absolu). C'est un capteur linéaire à infrarouge qui nous renseigne sur l'évolution de la teneur en CO_2 , en lien avec la consigne choisie (écart de CO_2). Lorsque la valeur haute est dépassée, le système active le piège à CO_2 (soude) jusqu'à ce que la valeur basse soit atteinte.

Le piège à CO_2 : au cours de la régulation, lorsque la teneur en CO_2 dépasse la valeur consigne, le flux est dirigé dans le piège contenant de la soude 0,1N à travers un filtre fritté (**Figure 3**). Le CO_2 est piégé, ce qui crée une dépression dans l'enceinte de mesure. Une sonde à résistivité permet de déterminer la quantité de carbonate dans le piège.

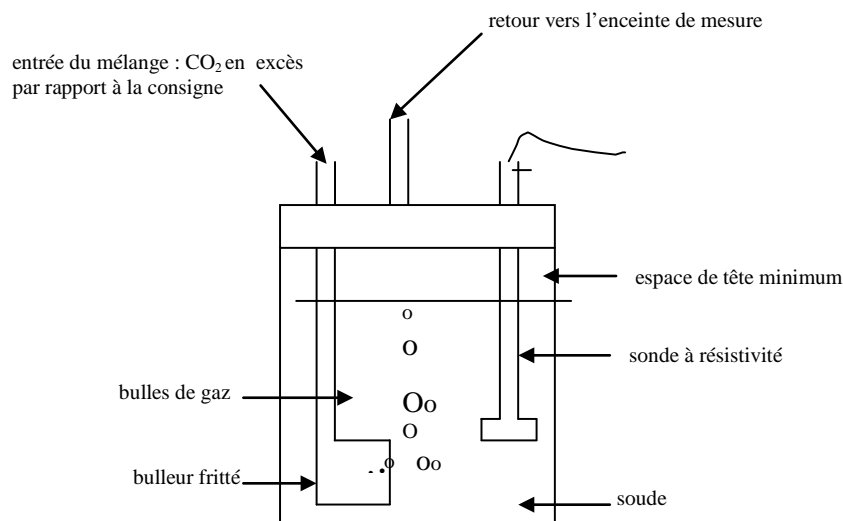


Figure 3. Le piège à CO_2 .

La sonde à résistivité peut mesurer des valeurs allant de 15 à 50 $\Omega\cdot\text{m}^{-1}$ (à une précision du dixième d'ohm) correspondant à la carbonatation de la soude. La résistance (grandeur électrique) de la solution de soude est proportionnelle à la résistivité de la solution et donc inversement proportionnelle à la concentration de carbonate dans la solution. La sonde est reliée à un résistivimètre de laboratoire Consort modèle C861.

De l' O_2 ayant été consommé et le CO_2 piégé, cela crée une dépression dans l'enceinte de mesure.

Le capteur de pression : AutoTran Inc, ref S 600 transducers. Placé entre l'enceinte de référence et l'enceinte de mesure, il est constitué d'une membrane qui se déforme sous l'effet d'un changement de pression et d'un capteur (pont de Wheaton) qui mesure cette déformation (**Figure 4**). En cas de dépression, le système commande une injection de gaz afin de rétablir l'équilibre.

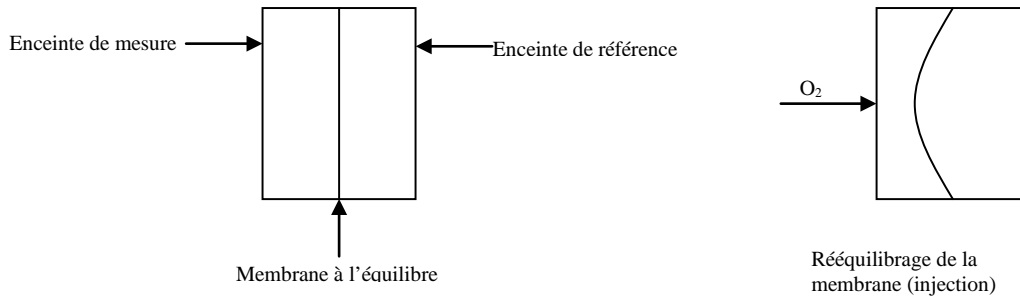


Figure 4. Le capteur de pression.

Ce capteur peut détecter des variations de pression de l'ordre du Pascal (Pa) mais dans notre système il commande l'équilibre des pressions lorsque la différence entre les deux enceintes atteint 24 Pa. Cela permet de limiter l'erreur cumulative sur les quantités injectées lors des mises en marche successives du débitmètre massique.

Le débitmètre massique : MKS, réf 1179G 11CS 1BV. Il sert à injecter le gaz (O_2 ou N_2) dans l'enceinte de mesure; sa plage d'utilisation est de 0 à $10 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ mais il est réglé à $5 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ et à une précision de 0,1 %. Son débit et le temps d'injection à chaque régulation de pression sont enregistrés et permettent de calculer les quantités de gaz injectées (et donc l'oxygène consommé). Un débitmètre est calibré pour un gaz donné ; pour une utilisation avec un autre gaz, il existe un facteur de conversion massique. Entre N_2 et O_2 ce facteur étant de 0,99 nous avons décidé de le négliger.

La partie électronique se compose de deux convertisseurs de signaux et d'une carte à microcontrôleur.

Convertisseur AD, Linear LTC 2499 (19 bits, 8 voies) et *Convertisseur DA*, Linear, LTC 2605 (16 bits, 8 voies). Ils utilisent un bus I2C.

La carte à microcontrôleur : équipée d'un microcontrôleur Beck DK 50. Cette carte programmable en langage C possède plusieurs ports entrées et sorties, des bus I2C pour dialoguer avec les différents périphériques (capteurs, convertisseurs A/D et D/A) plus un port Ethernet RJ 45 pour dialoguer avec un PC qui permet la supervision. Elle permet de consigner les valeurs de température, d'écart de CO_2 et la base de temps et d'enregistrer à chaque évènement et/ou en fonction de la base temps tous les paramètres mesurés.

3. Calibrage

On contrôle la conformité des mesurandes de cet automate par le calibrage qui permet de valider l'exactitude, la justesse et la fidélité des deux chaînes d'acquisition.

3.1 Etalonnage de la chaîne d'acquisition principale

La chaîne d'acquisition principale est constituée d'un débitmètre massique, d'une pompe et des analyseurs O_2 et CO_2 .

Le réglage du zéro, la linéarité et la précision de cette chaîne d'acquisition sont contrôlés en effectuant un balayage avec différents mélanges gazeux : 100% azote pour le zéro et mélanges ternaires certifiés (norme ISO 6141) de 10% O₂-10% CO₂ et 20% O₂-20% CO₂. Le calibrage se fait en commençant par le zéro puis en augmentant les teneurs en O₂ et CO₂ puis en redescendant jusqu'au zéro pour vérifier les phénomènes d'hystérésis. Si les valeurs sont inexactes, un ajustement des capteurs est réalisé (via les notices du constructeur des capteurs). Après un nouveau calibrage, si les valeurs sont toujours inexactes, le capteur est déclaré non-conforme et changé. Chaque calibrage induit l'écriture d'un document, le certificat d'étalonnage.

Pendant le fonctionnement du respiromètre, les atmosphères (et donc la chaîne d'acquisition et d'injection) dans les enceintes sont contrôlées par chromatographie en phase gazeuse (CPG-TCD) en prélevant une aliquote à travers un septum.

3.2 La régulation thermique

La régulation thermique du bain marie est constituée d'un capteur numérique Max6633 et d'une résistance de chauffage (500 W). La calibration consiste à comparer les indications données par l'instrument de mesure aux valeurs fournies par un thermomètre étalon placé dans le même milieu. Le thermomètre de référence est un thermomètre Ahlborn (réf : 2390-5) avec une précision de $\pm 0,1^\circ \text{C}$. Il est vérifié une fois par an à l'UMR EMMAH du Centre INRA PACA, qui possède un système de contrôle raccordé à un étalon national. On contrôle et corrige si besoin l'exactitude de la droite de calibrage. Chaque calibrage induit l'écriture d'un document, le certificat d'étalonnage.

3.3 L'étalonnage de la soude

Les quantités de dioxyde de carbone produites par le végétal et piégées dans la soude sont estimées en comparant le degré de carbonatation de cette soude à des solutions de soude différemment carbonatées puis titrées. La droite d'étalonnage obtenue de la résistivité en fonction de la carbonatation permet le calcul de l'IR_{CO₂}. Pour affiner la précision de ces mesures, l'étalonnage est réalisé pour chaque couple sonde/résistivimètre.

4. Fonctionnement et données obtenues

4.1 Mise en route

Afin de gagner du temps sur la mise en régime du respiromètre (les fluctuations thermiques entraînant des fluctuations de pression), les végétaux sont placés à la température d'analyse quelques heures avant le début de l'expérimentation. La première opération consiste ensuite à mettre le respiromètre sous tension (général et pompe) et à lancer la régulation thermique. Le paramétrage des consignes se fait séparément pour chaque respiromètre par ordinateur, grâce à l'interface « Respiro » développée au laboratoire : la température du bain est renseignée et le respiromètre mis en chauffe.

Après pesée, les lots de végétaux sont placés dans les enceintes de mesure et les couvercles sont hermétiquement fermés. Une quantité précise de soude (à la température d'analyse également) est préparée dans chaque piège (par pesée) puis les pièges sont installés sur le respiromètre, en vérifiant bien le sens de circulation de la pompe. Le niveau d'eau du bac est ensuite augmenté pour immerger les enceintes).

Pendant cette phase, les vannes sur les couvercles sont ouvertes pour permettre l'équilibre des pressions avec l'extérieur. Si les mesures demandées sont sous une atmosphère particulière, un balayage gazeux est effectué dans les enceintes grâce à ces vannes. Dans les cas

d'atmosphères riches en CO₂, il est souvent nécessaire d'effectuer un second balayage après une première phase de mise en régime. En effet, ce gaz se dissolvant dans les végétaux, la teneur en CO₂ va baisser, restant inférieure aux consignes de régulation, ce qui va perturber le bon fonctionnement du respiromètre. Ce phénomène est d'autant plus marqué que la température est basse. Lorsque les conditions d'atmosphère sont atteintes, les vannes sont fermées.

Sur l'interface, les autres consignes doivent être renseignées : pression basse (180) et haute (280), base de temps (pour une lecture régulière en plus de l'enregistrement des régulations) et écart du CO₂ (0 pour un piégeage en continu ou 100 pour un écart maximum de +1%). Puis la régulation est lancée. Après quelques minutes de fonctionnement, lorsque les températures et atmosphères sont homogénéisées, il est souvent préférable d'arrêter et de relancer les respiromètres. Travaillant en valeurs relatives (écart par rapport à une valeur initiale lue) cette nouvelle saisie des consignes (sans ouverture des enceintes) nous affranchit de valeurs initiales erronées liées à l'inertie du système.

Le suivi du bon fonctionnement des respiromètres se fait via l'interface grâce aux tracés des variations de pression. Un aperçu des données peut également être fait en ouvrant le fichier d'acquisition. Une surveillance visuelle des pièges à soude est nécessaire pour éviter tout débordement dans le système de circulation et pour changer si besoin la soude (saturation visible par plafonnement des valeurs de conductimétrie et/ou augmentation des valeurs de CO₂).

4.2 Données

Les données stockées au fur et à mesure dans le fichier d'acquisition (.txt) sont transférées dans un fichier Excel ; elles correspondent aux colonnes A à H du **Tableau 1**. Elles concernent le temps, le débitmètre massique (débit et temps d'injection), la conductimétrie de la soude, la température (°Cx100), la pression et les teneurs en CO₂ et O₂ (% x1000).

Tableau 1. Feuille de calcul Excel pour les données du respiromètre

Respiration sous 15 % O ₂ - 8 % CO ₂										8°C		R3					
sept-09																	
		V1	V2	V3													
poids soude		233	232.2	229.9	équation soude S9												
poids matéri		0.52							y = -3336.6 x + 26.161								
										où y = mmol CO ₂ pour 100ml de soude							
										et x = 1/conduct x 100							
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	
D.M.																	
mn	débit	temps	Conduc.	Temp.	P	CO ₂	O ₂	temps		Q O ₂ débité	Q CO ₂ piégé			CO ₂	O ₂		
	(sx10)							(h)	(j)	(ml)	1/conduc.	(mmol)	(ml)	(ml totaux)	(%)	(%)	
480	527	0	14709	800	241	8118	14538	8.0	0.3	0.00	0.00007	8.10	181.47	0.00	8.12	14.54	
496	523	182	14711	801	281	8187	14428	8.3	0.3	1.55	0.00007	8.11	0.16	0.16	8.19	14.43	
516	521	2223	14817	802	281	8162	14448	8.6	0.4	20.40	0.00007	8.49	8.63	8.63	8.16	14.45	
540	527	0	14840	802	211	8071	14574	9.0	0.4	20.40	0.00007	8.57	10.45	10.45	8.07	14.57	
548	522	183	14843	800	281	8097	14528	9.1	0.4	21.95	0.00007	8.58	10.69	10.69	8.10	14.53	
574	525	183	14853	801	281	8208	14431	9.6	0.4	23.52	0.00007	8.61	11.48	11.48	8.21	14.43	
589	527	2226	14910	801	281	8162	14461	9.8	0.4	42.61	0.00007	8.81	15.96	15.96	8.16	14.46	
600	525	0	14916	801	250	8005	14637	10.0	0.4	42.61	0.00007	8.83	16.43	16.43	8.01	14.64	
620	527	186	14934	801	281	8094	14548	10.3	0.4	44.21	0.00007	8.90	17.84	17.84	8.09	14.55	
647	524	183	14943	801	281	8199	14408	10.8	0.4	45.77	0.00007	8.93	18.54	18.54	8.20	14.41	

Les colonnes I à Q sont des colonnes de calcul. Pour la quantité d'oxygène injectée (correspondant à la quantité consommée par le végétal), le calcul se fait à partir des données du débitmètre massique (colonnes B et C). Pour la quantité de CO₂ piégé, les calculs de la colonne M sont basées sur l'équation d'étalonnage de la soude, qui fait appel à la

conductimétrie (colonnes D et L) et à la quantité de soude dans le piège (Vx). La colonne O calcule la quantité de CO₂ totale piégée, en déduisant la carbonatation initiale de la soude (1^{ère} valeur de la colonne N) et en cumulant les valeurs après un changement de soude (affectant les colonnes M et N).

A partir de ces données, nous pouvons tracer différents graphes pour suivre le fonctionnement du respiromètre. Les exemples de la **Figure 5** montrent que les teneurs en CO₂ et O₂ ont été régulées à +/- 0,2% et la température à 0,5°C. Le graphe de la conductimétrie montre les deux changements de soude effectués pendant la mesure, pour éviter la saturation. La quantité de CO₂ piégé est obtenue en sommant les trois portions de courbe, après calcul (colonne O).

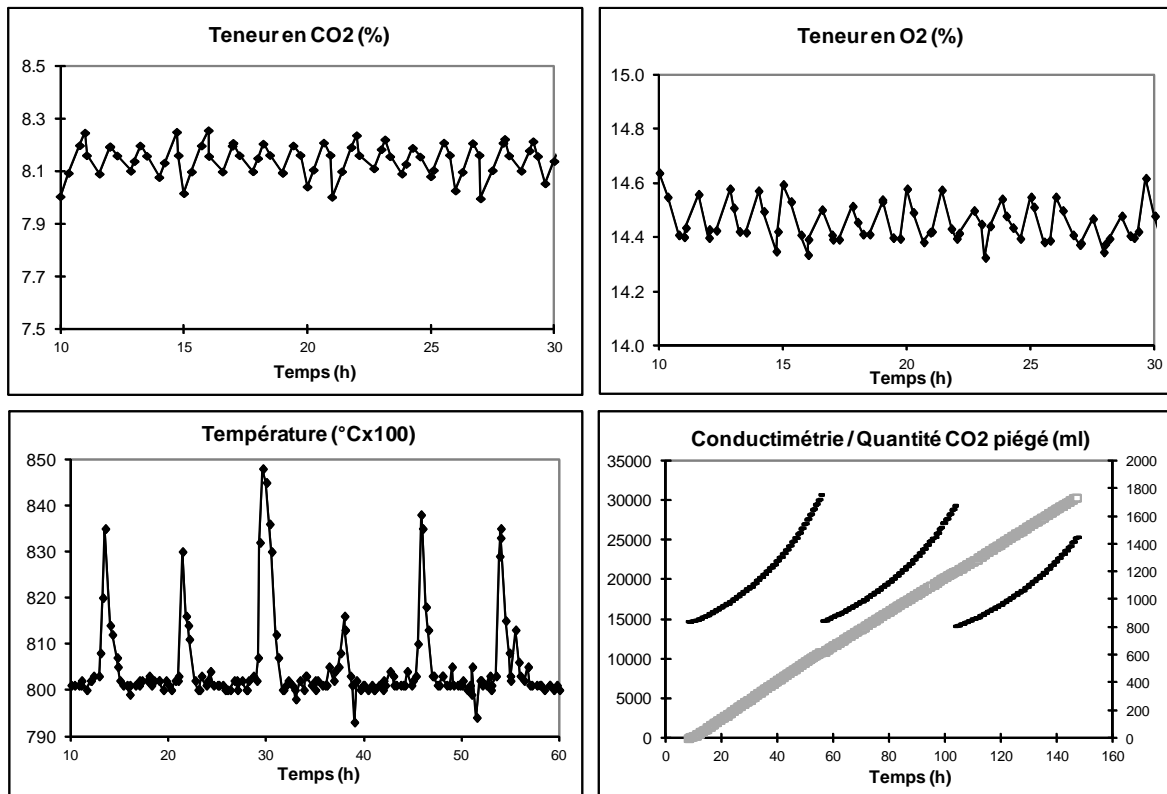


Figure 5. Suivis des teneurs en CO₂ et en O₂, de la température du bain-marie, de la conductimétrie de la soude et de la quantité de CO₂ piégé lors du fonctionnement d'un respiromètre (conditions initiales : 8°C, 8% CO₂-14,5% O₂).

5. Exemples d'exploitation des résultats

5.1 Mesure des intensités respiratoires

Dans le cadre d'un projet européen (Master), le respiromètre nous a permis de déterminer les paramètres respiratoires de la tomate en fonction de la composition de l'atmosphère de conservation. La **Figure 6** montre l'effet des teneurs en oxygène et en gaz carbonique sur l'IR_{O2} de la tomate à 13°C, dans 20 conditions différentes.

La respiration de la tomate (IR_{O2}) diminue avec la baisse de la teneur en O₂ mais également avec l'élévation de la pression partielle en CO₂. Ce double effet n'est pas complètement linéaire car il dépend du couple O₂/CO₂. En effet, chaque végétal va être plus ou moins sensible à la présence de CO₂ (phytotoxicité) et cette sensibilité est souvent dépendante de l'oxygène présent (exemple : phytotoxicité du CO₂ qui augmente avec une baisse de

l'oxygène). Pour quantifier cet effet, on peut estimer la constante d'inhibition (K_i) du CO_2 c'est à dire la teneur en CO_2 qui divise par deux l'intensité respiratoire maximale. Cette valeur s'obtient en déterminant la respiration en élevant la teneur en CO_2 pour une même pression partielle d'oxygène.

De la même façon, l'influence de l'oxygène peut être quantifiée, par simplification, en assimilant la chaîne respiratoire à son étape la plus lente et en appliquant la loi de Michaelis et Menten (cinétique enzymatique) selon laquelle la vitesse de la respiration augmente hyperboliquement avec la teneur en substrat (O_2). Dans l'exemple ci-dessus, une estimation peut être faite à partir des trois valeurs obtenues sans CO_2 dans l'atmosphère, mais le respiromètre peut être adapté pour une détermination plus précise.

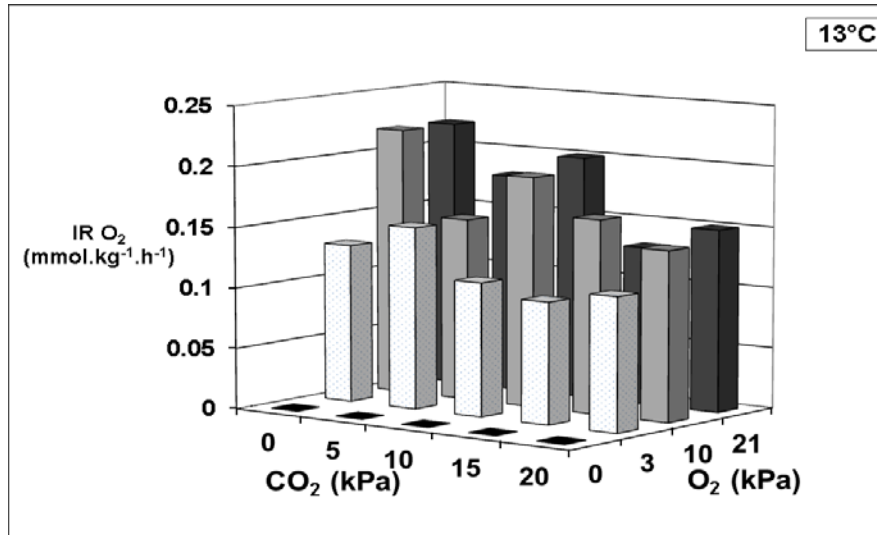


Figure 6. Evolution de la vitesse de consommation d'oxygène (IR_{O_2}) de la tomate (variété Raïssa) à 13 °C en fonction de la teneur en O_2 et CO_2 de l'atmosphère de conservation.

5-2 Mesure du K_m apparent

Une légère modification des circuits de l'appareil permet la détermination automatique du K_m apparent (pseudo K_m) ; il suffit de remplacer l'apport d'oxygène par de l'azote. Le respiromètre mesure alors la décroissance de la teneur en O_2 provoquée par la respiration du végétal en fonction du temps. La **Figure 7** présente le résultat obtenu avec des avocats placés à 20°C.

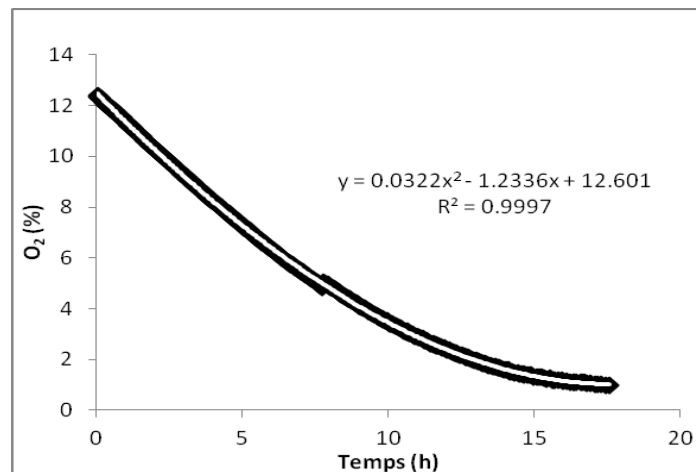


Figure 7. Evolution de la teneur en O_2 dans l'enceinte de mesure contenant des avocats, à 20°C.

La courbe obtenue est ensuite informatiquement ajustée à une fonction polynomiale d'ordre suffisant pour obtenir un coefficient de détermination R^2 supérieur à 0,99. La dérivation de l'équation polynomiale (dO_2/dt) permet de calculer l'intensité respiratoire, que l'on peut ensuite représenter en fonction du temps ou en fonction de la teneur en O_2 . Lorsqu'un végétal est sensible à la teneur en oxygène, son intensité respiratoire va décroître au cours du temps et avec la baisse de la teneur en O_2 (**Figure 8**).

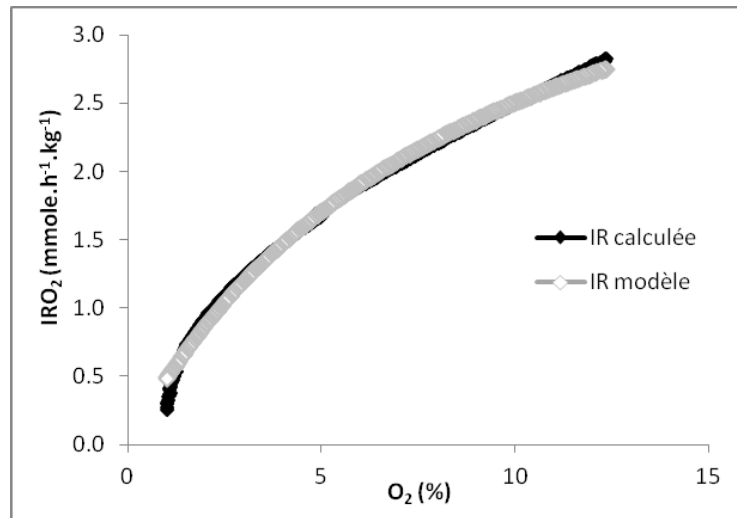


Figure 8. Ajustement mathématique de la respiration de l'avocat (IR_{O_2}) en fonction de la teneur en oxygène.

Afin d'estimer le K_m apparent, l'IR (ou vitesse de respiration, V_i) est modélisée suivant l'équation de Michaelis Menten :

$$V_i = V_m \times [S] / K_m + [S] \quad \text{avec } V_m = \text{respiration maximale}$$

$[S]$ = teneur en substrat (% d' O_2)
 K_m = constante de Michaelis

Les paramètres d'ajustement du solveur Excel sont R^2 en cellule cible ($R^2=1$) et K_m et V_m en cellules d'ajustement.

Pour l'avocat, la respiration maximale (V_m) est de 4,7 mmole.h⁻¹.kg⁻¹ et le K_m apparent est donné à 8,9%, ce qui veut dire que pour avoir un effet significatif d'une baisse de la teneur en O_2 sur la respiration de l'avocat, et donc prolonger sa durée de vie, il faudra prévoir un emballage conduisant au minimum à une teneur en O_2 proche de 9%.

Conclusion

La mise au point du respiromètre nous a permis de déterminer les paramètres respiratoires de nombreux végétaux, comme la tomate, l'avocat (exemples présentés) ou l'oignon et le champignon de Paris (Benkeblia et al., 2000 ; Varoquaux et al., 1999). Plus récemment, notre participation dans le projet ANR Tailorpack (2007-2011 - mise au point d'un emballage bio-sourcé à façon) nous a donné l'occasion de tester les dernières transformations de l'appareil sur l'abricot et la fraise (publication en cours), ce dernier fruit étant problématique du fait de son évolution très rapide.

Hors fruit et légume, des travaux sur les fromages (camembert, bleu) ont également été réalisés, permettant de cerner les atmosphères idéales de croissance des différentes souches de

bactéries, levures et moisissures présentes. Ces études ont montré par ailleurs la fiabilité de notre double respiromètre sur une utilisation longue (21 jours en continu) et son utilisation possible pour d'autres produits.

Références bibliographiques

Benkeblia N, Varoquaux P, Gouble B, Selselet-Attou G (2000) Respiratory parameters of onion bulbs. Effects of irradiation and temperature. *J Sci Food Agric* **80** : 1772-1778.

Chambroy Y, Souty M, Jacquemin G, Gomez RM, Audergon JM (1995) Research on the suitability of modified atmosphere packaging for shelf-life and quality improvement of apricot fruit. *Acta Horticulturae* **384** : 633-638.

Varoquaux P, Gouble B, Barron C, Yildiz F (1999) Respiratory parameters and sugar catabolism of mushroom (*Agaricus bisporus* Lange). *Postharvest Biol Technol* **16** : 51-61.

Varoquaux P, Gouble B, Ducamp M-N, Self G (2002) Procedure to optimize modified atmosphere packaging for fruit. *Fruits* : **57**, 313-322.

www.mksinst.com/product/Catalog.aspx?catalogID=3 (consulté le 2 juillet 2012)

<http://controllersensors.com/> (consulté le 2 juillet 2012)

www.servomex.com/servomex/web/web.nsf/fr/gas (consulté le 2 juillet 2012)

www.linear.com (consulté le 2 juillet 2012)

www.maxim-ic.com (consulté le 2 juillet 2012)

www.consort.be/Manuals.htm (consulté le 2 juillet 2012)