

Optimisation des Programmes de Nettoyage et de Désinfection pour la destruction thermique de *Brettanomyces* dans les barriques en bois de chêne utilisées pour l'élevage des vins – Utilisation du protocole **BARREL CHECK EXCELL®**

Pascal CHATONNET

Laboratoire EXCELL
33701 MERIGNAC Cedex (France)

Introduction

La maîtrise de la qualité des vins élevés de manière prolongée en barriques impose de conserver ces vins dans de récipients parfaitement sains du point de vue de leur composition physico-chimique et microbiologique. Les procédés d'entretien et de désinfection des récipients vinaires en bois de chêne utilisés pour l'élevage des vins ont été étudiés pendant plusieurs années afin de bien les caractériser et les optimiser afin d'obtenir une désinfection microbiologique aussi performante que possible sachant parfaitement qu'aucune stérilisation n'est pas possible en l'état des techniques employées.

Désormais, dans beaucoup de caves, des barriques d'âges très différents sont périodiquement soutirées, nettoyées et désinfectées grâce à la mise en œuvre de laveur automatique utilisant de l'eau froide, l'eau chaude à 80-85°C à haute pression pour le nettoyage puis éventuellement de la vapeur à 100°C pour leur désinfection.

L'élimination des germes microbiens indésirables et notamment des levures de contamination du genre *Brettanomyces/Dekkera* qui ont pu causer certains problèmes dans différents lots de vins au cours des années passées peut être obtenue de différentes manières ;

a) En mettant les micro-organismes dans des conditions défavorables à leur développement (ils resteront dans le produit mais sans aucune activité significative et donc sans aucun risque d'altération ou de nuisance) en réduisant la température des chais d'élevage par exemple ;

b) En détruisant les microorganismes :

- ↪ Par l'action des radiations ionisantes ;
- ↪ Par l'action des traitements chimiques (antiseptiques)
- ↪ **Par l'action de la chaleur (c'est la Destruction Thermique des Microorganismes ou DTM)**

Ce traitement a pour effet de détruire ou d'inhiber totalement, d'une part les enzymes, d'autre part les micro-organismes dont la présence ou la prolifération pourraient altérer la denrée considérée ou la rendre impropre à la consommation.

Dans ce travail, après certaines généralités sur les principes et le raisonnement de la destruction thermique des micro-organismes, nous étudierons l'application de la destruction thermique à la maîtrise de la désinfection des contenants en bois utilisés pour l'élevage prolongé des vins en

barriques. Les procédés de nettoyage et de désinfection antérieurement utilisés seront décrits, puis une tentative d'optimisation des matériels à disposition, en modifiant les programmes et les enchaînements des cycles de lavage à base d'eau chaude et désinfection à base de vapeur, sera proposée.

I- Calcul des barèmes de traitement thermique pour la DTM

1. Généralités

Le calcul du barème du traitement thermique qu'il faut appliquer pour assurer la conservation d'un produit déterminé se fonde sur deux données expérimentales :

- La **sensibilité des micro-organismes à la chaleur** dans le produit en question
- et La **vitesse avec laquelle la chaleur pénètre dans ce produit**.

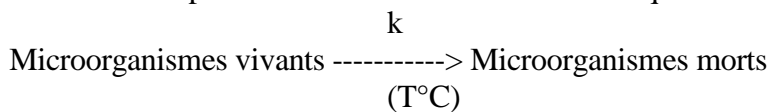
a) Effet de la chaleur sur la cellule microbienne :

L'effet de la chaleur sur la cellule microbienne est généralement expliqué par **une action au niveau moléculaire**; une augmentation de la température entraîne une augmentation de **l'agitation moléculaire**, d'où une plus grande probabilité de **rupture de certaines liaisons chimiques** qui modifierait la configuration des molécules et leur composition.

L'action de la chaleur est mortelle quand sont **modifiées de façon irréversible les molécules nécessaires à la vie de la cellule**; ces molécules sont supposées être des **acides nucléiques** et des **protéines enzymatiques**.

b) Traitement thermique d'un milieu et interprétation de la réaction de la DTM

Le traitement thermique d'une suspension de micro-organismes, qui peut être toute substance naturelle, consiste à porter ce milieu à **une température létale T pendant un certain temps t**; le résultat escompté est une réduction, par la "mort", du nombre initial de **micro-organismes**. Cette "mort" ne survenant pas au même moment du traitement à toutes les cellules microbiennes est interprétée comme une réaction biochimique.



k caractérise la résistance des microorganismes à la chaleur, il dépend:

- 1) du type de microbe ;
- 2) du milieu de culture dans lequel il s'est développé ;
- 3) du milieu dans lequel se trouve ce microorganisme au cours du traitement thermique (milieu variable ou milieu invariable)

2. Considération sur la sensibilité des micro-organismes à la chaleur

2.1. Lois et paramètres de la D T M

L'action de la chaleur sur les microorganismes, et plus particulièrement sur leurs spores qui constituent la forme la plus résistante sera influencée par la durée de chauffage à une température déterminée, et par la température pour une durée de chauffage fixe.

2.2.1.1. Hypothèses de base pour l'établissement des lois de la DTM

Pour énoncer les lois générales de la D.T.M., nous :

- Considérons une même souche bactérienne, qui s'est développée dans un même milieu de culture (mêmes conditions de croissance, etc) et qui se trouve dans un milieu de suspension "invariable" au cours du chauffage (la composition, le pH, et l' a_w du milieu restent constants au cours du chauffage (M.S. aqueux et homogènes)
- Supposons que la température létale de chauffage est atteinte instantanément dans le milieu et y est maintenue constante pendant toute la durée du traitement

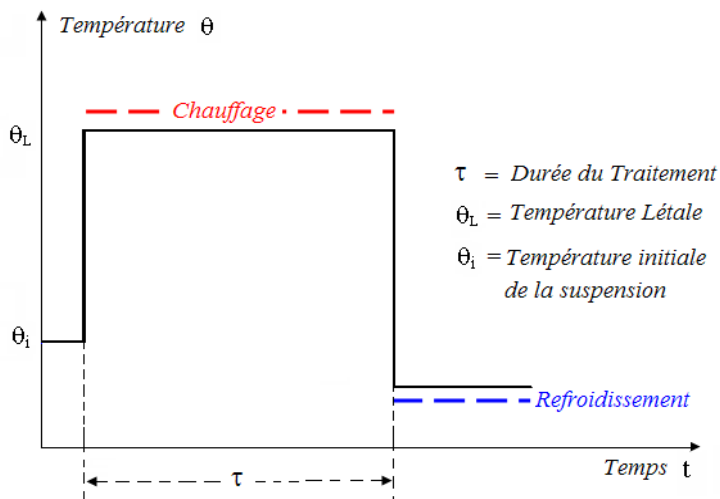


Figure 1. Modèle idéalisé d'évolution de la température dans la suspension microbienne

2.2.1.2. Mortalité des micro-organismes en fonction de la durée de chauffage (1^e loi)

2.2.1.2.1. Etablissement de la première loi : Influence du temps de chauffage

Lorsqu'on étudie expérimentalement sur une suspension de spores bactériennes l'action du chauffage à une température létale déterminée on observe que le nombre de spores survivant au chauffage varie inversement à la durée de celui-ci, selon une relation logarithmique.

L'expression mathématique de la première loi s'écrit:

- Pendant un intervalle de temps dt :

$$dNm/dt = -k Nm \quad (1)$$

k : la constante de vitesse de la réaction

- Après intégration entre les temps 0 et t on obtient:

$$\ln (Nm/Nm_0) = -k t \quad (2)$$

Ou encore:

$$\log (Nm / Nm_0) = - \frac{k}{2,303} t \quad (3)$$

$$\log (Nm / Nm_0) = - \frac{t}{D_T} ; \text{ avec } D_T = 2,303/k \quad (4)$$

2.2.1.2.2. Tracé de la courbe théorique de survie et définition de D_T

D_T = Temps de chauffage nécessaire pour réduire la population bactérienne initiale au dixième de sa valeur, à la température T considérée est appelé "temps de réduction décimale". En d'autres termes D_T représente la durée de chauffage, dans les conditions de l'expérience qui entraîne une réduction de 90 % de la population microbienne présente (figure 2)

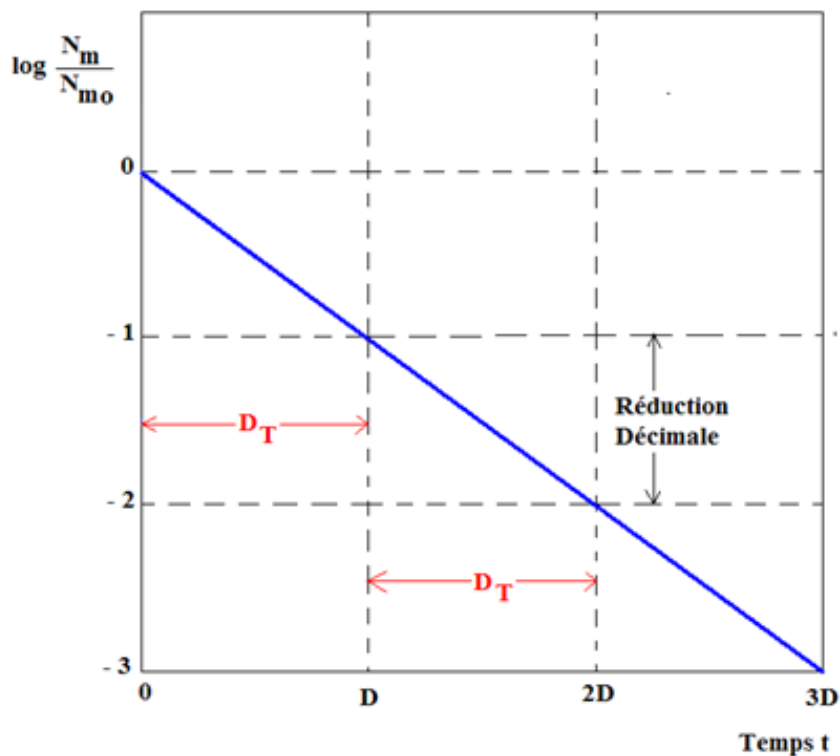


Figure 2- Courbe théorique d'inactivation thermique des microorganismes

On voit que D_T est la durée nécessaire pour que la droite traverse un cycle logarithmique.

Si N_{m1} est le nombre de microbes vivants au temps t_1 et N_{m2} au temps t_2

$$D_T = \frac{t_2 - t_1}{\log N_{m1} - \log N_{m2}} \quad (5)$$

D_T : Sert à caractériser la thermo résistance des microbes. C'est un moyen commode pour la comparaison des thermo résistances de différentes souches microbiennes dans un même milieu ou dans des milieux différents.

Toutes choses étant égales par ailleurs D_T est une fonction de la température. Cette variation sera exprimée par la 2^{ème} loi de destruction thermique (donnée plus loin)

La première loi nous indique deux faits importants :

1- Le risque de survie dans une population microbienne soumise à un chauffage est d'autant plus faible que la population est moins dense (N_{m0} faible).

Ainsi un barème de traitement thermique appliqué à un produit pourra être suffisant ou non selon la charge microbienne initiale, il faut par conséquent veiller, à chaque stade de la fabrication, par des mesures d'hygiène appropriées, à maintenir la charge microbienne à un niveau aussi bas que possible.

2-Théoriquement, il n'est pas possible d'atteindre la stérilité absolue ($N_m = 0$) puisque ceci d'après la courbe nécessiterait un temps infini, ce qui est impossible par ce qu'il endommagerait l'intégrité du produit alimentaire. On parle normalement de stérilité pratique (ou commerciale)

- Exemple de Déviation par rapport à la courbe théorique de survie (à la première loi de la DTM, figure 3)

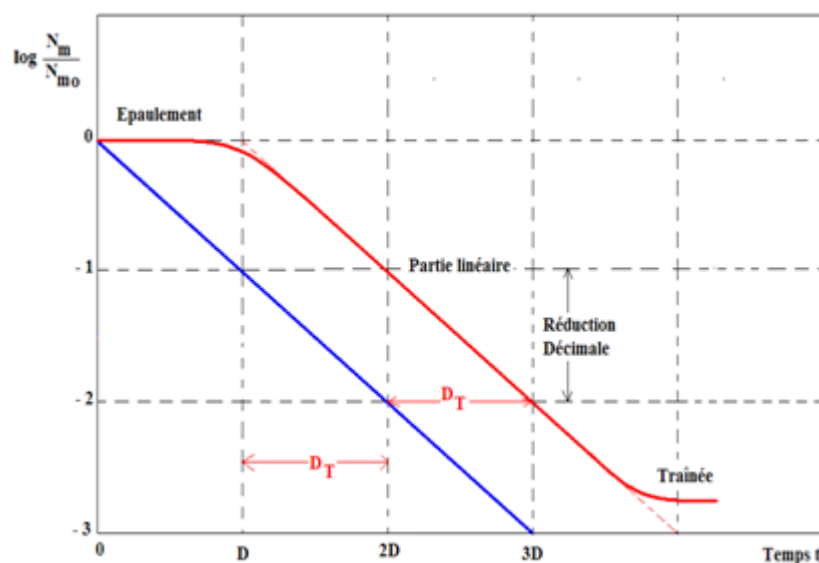


Figure 3- Exemple de déviation par rapport à la courbe théorique de survie (de la 1^{ère} loi)

L'expression mathématique de cette 2ème loi s'écrit alors, pour les points (t₁, T₁) et (t₂, T₂) situés sur une TRT

$$\log \frac{t_1}{t_2} = \frac{T_2 - T_1}{Z} \quad (8)$$

Z est l'accroissement de température nécessaire pour réduire la durée d'application du traitement au 1/10 tout en assurant le même taux de réduction. On voit que Z est le nombre de degrés correspondant à la traversée d'un cycle logarithmique par la droite.

L'équation (8) est généralement connue sous la forme

$$\text{Log} \frac{D_{T1}}{D_{T2}} = \frac{T_2 - T_1}{Z} \quad (9) \quad (\text{l'équation de la droite TRT}_1)$$

La connaissance de Z et d'une valeur D_T suffit à caractériser entièrement la thermo résistance d'une souche microbienne.

2.2.1.3.4. Relation entre Z et Q₁₀

Le Q₁₀ d'une réaction est le coefficient par lequel sera multipliée la vitesse de cette réaction quand la température augmente de 10 °C. Il est défini de la façon suivante:

$$Q_{10} = V_2 / V_1$$

Avec : V₁ est la vitesse de la réaction à la Température T₁
 V₂ sa vitesse à la Température T₂ = T₁ + 10

Pour la plupart des réactions chimiques Q₁₀ est compris entre 2 et 3.

Pour les réactions bactériennes le Q₁₀ est relié à Z par la relation suivante :

Note :

Cette relation est établie à partir de la 2^{ème} loi de la DTM. Une vitesse de réaction multipliée par Q₁₀ signifie un temps de réaction divisé par Q₁₀. La 2^{ème} loi de la DTM s'écrit :

$$\log \frac{t_1}{(t_1 / Q_{10})} = \frac{(T_1 + 10) - T_1}{z} \quad \Longrightarrow \quad Z (^\circ\text{C}) = 10 / \log (Q_{10})$$

A titre d'exemple: Z=5°C correspond Q₁₀ =100 et à Z=10°C correspond Q₁₀ =10

2.2.2. Influence du milieu de traitement sur la thermo résistance des micro-organismes (DTM dans les milieux de suspension "variables" au cours du chauffage)

2.2.2.1. Considérations générales :

Un certain nombre de paramètres affectant directement la thermo résistance d'une souche microbienne peuvent évoluer de façon considérable et imprévisible au cours du traitement thermique.

Dans de tels cas, les lois précédemment établies tombent en défaut et ne sont plus directement applicables.

2.2.2.1.1. Examen de quelques facteurs affectant la thermo résistance des microorganismes

2.2.2.1.1.1. Effet du pH

Le pH a un double effet sur la résistance et sur la croissance:

a) Sur la croissance des micro-organismes:

Les micro-organismes se caractérisent par 3 valeurs de pH de croissance : un pH minimum, un pH optimum et un pH maximum.

	pH min.	pH optimum	pH maximum
Moisissures	1.5-3.5	4.5-6.8	8.11
Levures	1.5-3.5	4.0-6.5	8.0-8.5
Bactéries	4.5	6.5-7.5	9.0

Au-delà du pH min et du pH max de multiplication, les microbes toujours vivants sont pratiquement incapables de se reproduire, de métaboliser le substrat dans le lequel ils vivent et d'y synthétiser leur toxine le cas échéant.

Certaines bactéries, notamment les bactéries lactiques et acétiques, sont capables de se multiplier à des pH plus bas que 4.5.

Les spores bactériennes ne peuvent pas proliférer dans les milieux dont le pH est inférieur à 4,5, rare exception *Bacillus thermoacidus* qui peut, dans le jus de tomate se développer à pH compris entre 4 et 4,5.

Etant donné que les bactéries pathogènes et la majorité des bactéries d'altération ne se développent pas à des pH < 4.5, on divise les produits alimentaires en deux catégories : les **produits faiblement acides**, dont le pH est ≥ 4.5 et les **produits acides**, dont le pH < 4.5.

b) Sur la résistance à la chaleur des micro-organismes:

En général, c'est aux pH compris entre 5,5 et 7,5 que les microbes résistent le mieux aux traitements thermiques. A titre d'exemple:

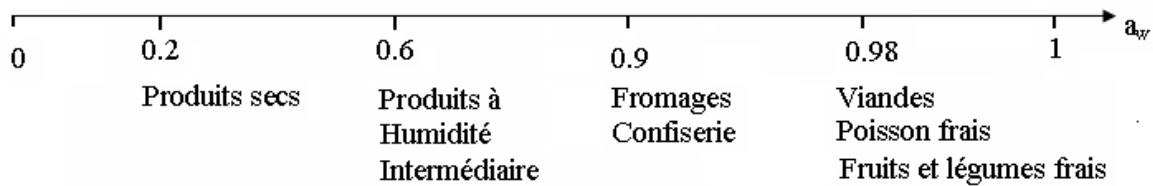
- Les spores de Cl. Botulinum ont une résistance max. à des pH compris entre 6,3 et 6,9

- Le D_T de ces spores se trouve en effet multiplié par 3 à 5, selon la température, quand le pH du milieu de suspension passe de 4,5 à 6,7.

2.2.2.1.1.2. Effet de l'activité de l'eau (a_w)

L'activité de l'eau (a_w) est le rapport de la pression de vapeur de l'eau dans le produit à la pression de vapeur d'eau pure aux mêmes conditions de température et de pression

L'activité de l'eau est une mesure de la disponibilité de l'eau dans un produit alimentaire. Plus l'eau est libre plus elle est disponible pour les micro-organismes qui en ont besoin pour leur métabolismes, Par contre si elle est absente ou liée dans l'aliment, les micro-organismes ont des difficultés à se multiplier. L' a_w varie entre 0 et 1 :



L' a_w a également un effet sur la résistance et un effet sur la croissance:

a) Sur la croissance des micro-organismes:

La croissance microbienne ne peut avoir lieu qu'au-delà d'une a_w minimale. Pour les germes toxigènes, la toxinogénèse est plus exigeante en termes d' a_w . C'est ainsi qu'une a_w minimale de 0.92 pour la croissance sera de 0.94 ou de 0.95 pour la toxinogénèse.

<u>Micro-organismes</u>	<u>(a_w) minimale</u>
Bactéries *	0,91 – 0,92
Levures	0,88
Moisissures	0,8
Bactéries halophiles	0,75
Moisissures xérophiles	0,65
Levures osmophiles	0,60

Note : Sauf pour les bactéries de l'espèce *S. aureus* pour lesquelles l' a_w minimale est 0.84

Par définition les germes halophiles sont des germes qui ne peuvent pas vivre en absence de NaCl. Ce sont surtout des bactéries. Elles peuvent tolérer des concentrations en sel proches de la saturation ($a_w = 0.75$)

Les germes xérophiles sont capables de se développer rapidement dans des conditions d' $a_w < 0.85$ (surtout 0.6 à 0.7). Ce sont surtout des levures et des moisissures.

Les germes osmophiles sont capables de se développer sous des conditions de pression osmotique élevée. Le terme osmophile est souvent utilisé pour décrire certaines levures qui

peuvent tolérer des concentrations très élevées en sucres, pouvant amener l' a_w à des valeurs de 0.6 – 0.78 .

b) Sur la thermo résistance des micro-organismes

Les micro-organismes sont beaucoup plus résistants à la chaleur quand le milieu est déshydraté, ou correspond à une solution aqueuse de faible a_w .

La résistance à la chaleur des spores augmente quand a_w diminue, et passe par un maximum pour des valeurs de a_w comprises entre 0,2 et 0,4

Remarque: En cas d'utilisation de la vapeur surchauffée pour la stérilisation de matériels ou de matériaux d'emballage il faut prendre en considération que celle-ci à un degré hygrométrique (humidité relative d'équilibre) inférieur à 1:

A pression atmosphérique, par exemple, une vapeur portée à 120°C à une humidité relative de 0,5, à 140°C elle est de 0,25. A ces valeurs de a_w , la thermo résistance des spores bactériennes est considérablement accrue.

3. Caractéristiques de la thermo résistance de *Brettanomyces/Dekkera*

Les caractéristiques de résistance de *Brettanomyces/Dekkera* (Tableau I, tiré des travaux de Hogg T., Neves F., Couto J.A, Campos F. 2005 Thermal inactivation of spoilage microorganism *Dekkera/Brettanomyces*, *Int. J. Food Microbiology* 104, 3, 337-344) au traitement thermique sont tirées des données expérimentales suivantes :

Tableau I – Temps de réduction décimale (D_T et valeur de Z pour une suspension de *Dekkera sp.* Dans un tampon tartrate pH 4,0

Decimal reduction times (D_T) and Z values determined in tartrate buffer (pH 4.0)					
Strain	Temperature (°C)	Exponential phase		Stationary phase	
		D_T (min)	Z (°C)	D_T (min)	Z (°C)
<i>D. bruxellensis</i> PYCC 4801	45.0	17.4 ($r^2=0.85$)	5.8 ($r^2=0.98$)	56.0 ($r^2=0.80$)	4.4 ($r^2=1.00$)
	50.0	3.8 ($r^2=0.99$)		3.4 ($r^2=0.98$)	
	52.5	1.0 ($r^2=0.94$)		1.1 ($r^2=1.00$)	
	55.0	0.3 ($r^2=0.95$)		0.4 ($r^2=1.00$)	
<i>D. anomala</i> PYCC 5153	45.0	33.3 ($r^2=0.81$)	4.5 ($r^2=1.00$)	48.5 ($r^2=0.87$)	4.3 ($r^2=0.99$)
	50.0	2.0 ($r^2=0.97$)		2.4 ($r^2=0.94$)	
	52.5	0.6 ($r^2=0.95$)		0.9 ($r^2=0.97$)	
	55.0	0.2 ($r^2=1.00$)		^a	
093	45.0	17.6 ($r^2=0.82$)	5.7 ($r^2=0.99$)	17.5 ($r^2=0.82$)	5.5($r^2=0.95$)
	50.0	2.7 ($r^2=0.96$)		4.8 ($r^2=0.95$)	
	52.5	1.0 ($r^2=0.91$)		0.7 ($r^2=0.99$)	
	55.0	0.3 ($r^2=1.00$)		0.3 ($r^2=1.00$)	

Values represent the mean of at least two experiments; relative standard deviation never varied more than 12% of the mean value.

^a Not determined.

En suspension dans un tampon tartrate, *Brettanomyces/Dekkera* présente un D_T à 45°C de 17,4 à 56 min selon l'état physiologique de la levure (Tableau I) ; la levure en forme stationnaire et physiologiquement moins équilibrée est beaucoup plus résistante à la température. Les spores que pourraient former *Dekkera* dans le vin ou à l'intérieur du bois imprégné sont certainement

encore beaucoup plus résistantes. **En revanche, en phase liquide, au-delà de 50°C, l'état physiologique n'a plus d'influence, le DT à 55°C se situe au tour de 0,3-0,4 min (18-24 s).**

Le facteur Z est constant autour de 5°C, ce qui est une valeur très classique pour les microorganismes du type levures ou moisissures (contre 10°C pour les bactéries). En conséquence, **une augmentation de la température de 5°C permettra de réduire le temps de traitement par 10 pour obtenir la même réduction des populations de microorganismes.**

Tableau II - Influence de la composition du milieu sur le temps de réduction décimal de *Dekkera* sp.

Decimal reduction times (D_T) determined in tartrate buffer (pH 4.0) with added phenolic acids (500 mg/l) or with ethanol (12% v/v)				
	<i>D. bruxellensis</i> PYCC 4801		<i>Dekkera/Brettanomyces</i> 093	
	D_{45}	D_{50}	D_{45}	D_{50}
Control	17.4 ($r^2=0.85$)	3.0 ($r^2=0.98$)	17.5 ($r^2=0.82$)	3.9 ($r^2=0.96$)
Ferulic acid	2.4 ($r^2=1.00$)	0.2 ($r^2=1.00$)	3.4 ($r^2=0.93$)	- ^a
Caffeic acid	10.9 ($r^2=0.75$)	1.1 ($r^2=0.99$)	12.3 ($r^2=0.74$)	0.9 ($r^2=0.96$)
Vanilic acid	13.3 ($r^2=0.70$)	0.6 ($r^2=1.00$)	14.6 ($r^2=0.85$)	1.1 ($r^2=0.96$)
Gallic acid	12.0 ($r^2=0.65$)	1.2 ($r^2=0.91$)	36.6 ($r^2=0.72$)	1.5 ($r^2=0.92$)
Ethanol (12% v/v)	0.7 ($r^2=0.99$)	- ^a	0.3 ($r^2=1.00$)	- ^a

Values represent the mean of at least two experiments; relative standard deviation never varied more than 12% of the mean value.

^a Not determined.

La présence d'éthanol à 12% vol ; dans le milieu réduit considérablement la thermo résistance de *Brettanomyces/Dekkera* (Tableau II) ; une température de 50°C avec une aW de 1 (milieu liquide aqueux) doit permettre facilement la destruction thermique de ces micro-organismes.

La plupart des souches microbiennes de *Brettanomyces/Dekkera* ne peuvent se développer pour une activité de l'eau inférieure à 0,90 ; certaines tolèrent des pressions osmotiques plus élevées correspondant à une activité de l'ordre de 0,60 en ralentissant leur métabolisme. Ces levures se placent dans un état de résistance notamment lorsque le bois des barriques se déshydrate fortement ou que le milieu in devient plus fortement inhibiteur (éthanol levé, pH plus bas, dioxyde de soufre actif plus élevé...).

En conditions d'élevage des vins en barrique, le front d'humectation du bois par le vin à l'intérieur des douelles dépend principalement du taux d'humidité de l'atmosphère de la cave. A 80% +/- 5, le front se situe entre 4,5 et 5,5 mm environ. En dessous de ce front le taux d'humidité du bois va donc varier entre 100 et 30% environ, il se maintient autour du point de saturation des fibres de 17-18% au-delà. En conséquence, entre 0 et 6 mm environ, l'eau libre imprègne les fibres et le lumen des cellules et l'aW peut être considéré comme non limitant (> 0,9). L'aW s'abaisse rapidement en cas de conservation des barriques vides et ce d'autant plus et d'autant plus vite que l'atmosphère de stockage sera sèche ; en dessous de 16% d'humidité relative du bois le retrait dimensionnel du bois n'est plus uniforme et va provoquer une moindre pression de contact entre les douelles ce qui affecte en retour l'intégrité et l'étanchéité de la barrique.

Entre 0 et 6 mm de profondeur dans la douelle, le taux d'éthanol varie également en fonction de l'humidité de l'air extérieur. Aux conditions de 80+/-5%, l'éthanol va varier entre 100 % et 50 % environ du taux d'éthanol du vin entre 0 et 6 mm.

Le taux d'humidité du bois, la profondeur du front d'humectation et le taux d'humectation du bois humecté affecteront à la fois la thermo résistance des levures de contamination et la conductibilité thermique du milieu.

En conséquence, en intégrant d'autres expériences réalisées par ailleurs (non montrées) pour déterminer la DT de *Brettanomyces/Dekkera* sur support solide (micro cellulose) avec une aW de l'ordre de 0,8, la température de 55°C permet d'obtenir des temps de réduction décimaux de l'ordre de 0,3 à 0,5 min qui s'abaissent d'autant plus que le taux d'éthanol dépasse 10 % vol. Tous ces éléments sont suffisants pour fixer les barèmes thermiques devant permettre une désinfection à cœur des barriques.

Une température de 55°C maintenue pendant plus de 25s devrait garantir la destruction de 90 % des populations de levures viables dans le bois à cœur ; un temps plus élevé sera nécessaire en cas de contamination pus importante.

II- Exemple de caractérisation des procédures de nettoyage et de désinfection des barriques par le protocole BARREL CHECK EXCELL®

1- Equipements

L'eau chaude est produite par une chaudière à 84°C et se retrouve injectée à 67°C dans la barrique sur un auto-laveur équipée de tête rotative permettant d'injecter soit de l'eau chaude à 14 L/min, soit de la vapeur à 100°C à raison de 2 kg/cm². La barrique est amenée automatiquement sur le poste de lavage ou de désinfection par le jeu d'un châssis mobile élévateur qui déplace la barrique d'un poste à l'autre au cours d'un cycle dit de transition. La température de l'eau, de la surface de la barrique et la température à 5 mm à l'intérieure des douelles est mesurée en continu à l'aide de thermocouples blindés dans une gaine de 1mm de diamètre.

2- Caractéristiques des cycles de lavage et de désinfection utilisés initialement

Les figures 4 à 8 ci-après illustrent les cycles alternant eau chaude-vapeur-eau froide employés dans différentes combinaisons dans différentes caves avec le temps classique de traitement employé jusque-là soit environ 250 secondes au total.

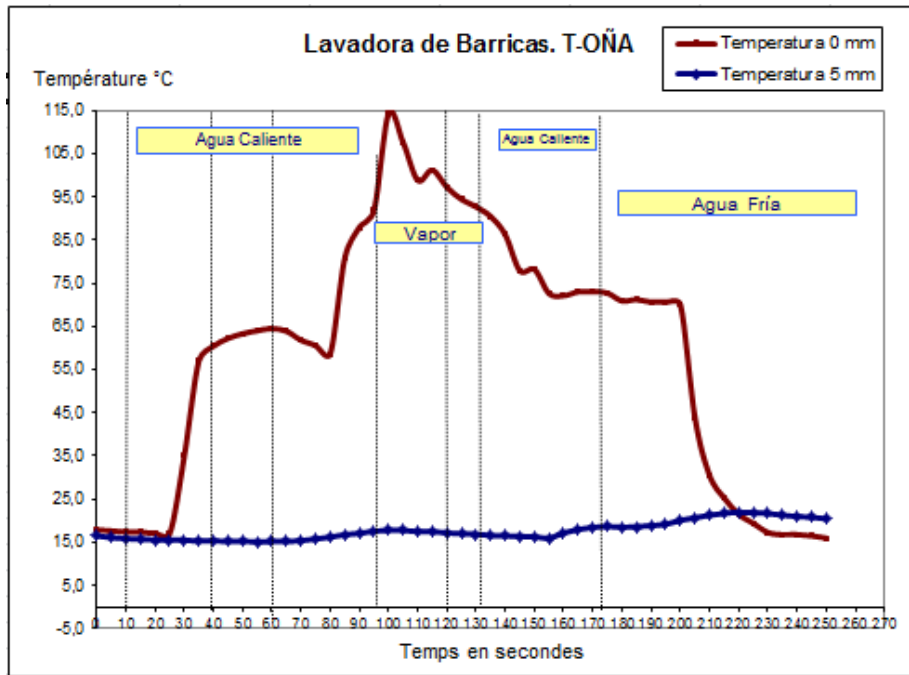


Figure 4 – Courbe de température du bois des barriques enregistrées en surface (0 mm) et en profondeur (-5 mm) au cours du protocole de lavage-désinfection de la cave TONA

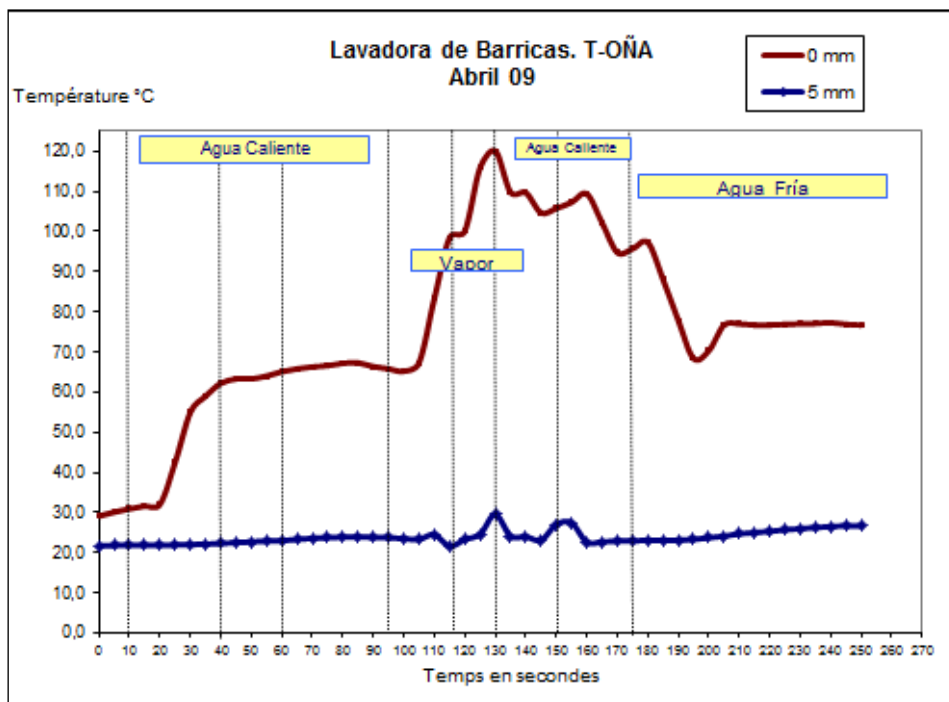


Figure 5 – Courbe de température du bois des barriques enregistrées en surface (0 mm) et en profondeur (-5 mm) au cours du protocole de lavage-désinfection de la cave TONA

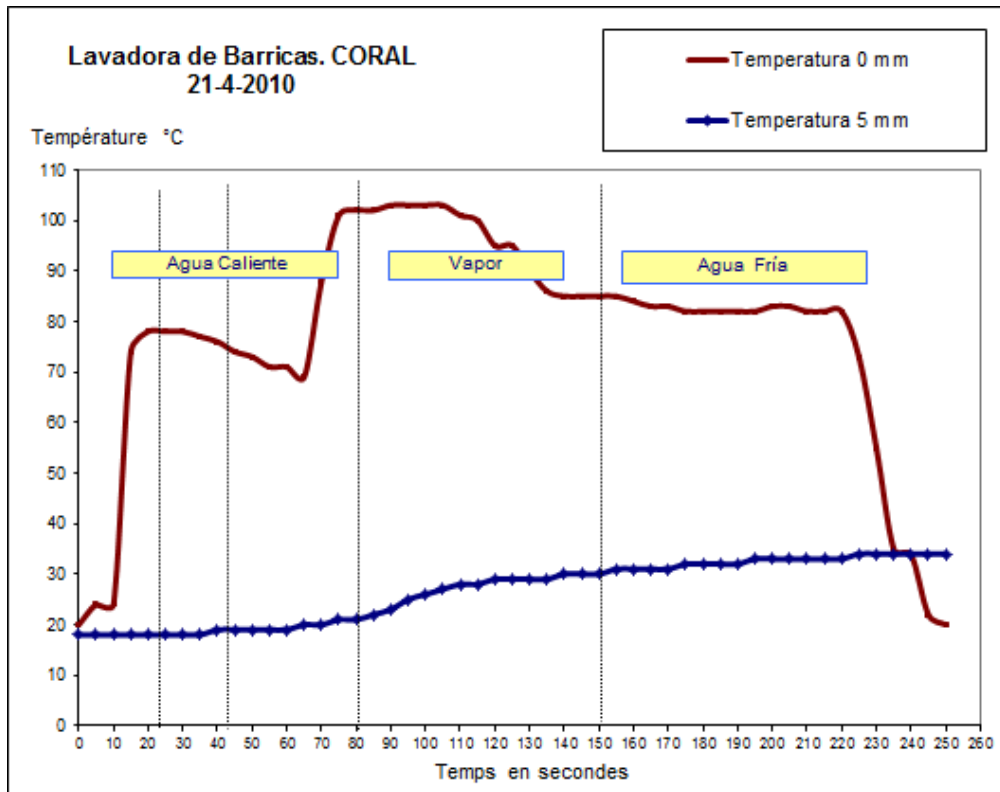


Figure 6 – Courbe de température du bois des barriques enregistrées en surface (0 mm) et en profondeur (-5 mm) au cours du protocole de lavage-désinfection de la cave CORRAL

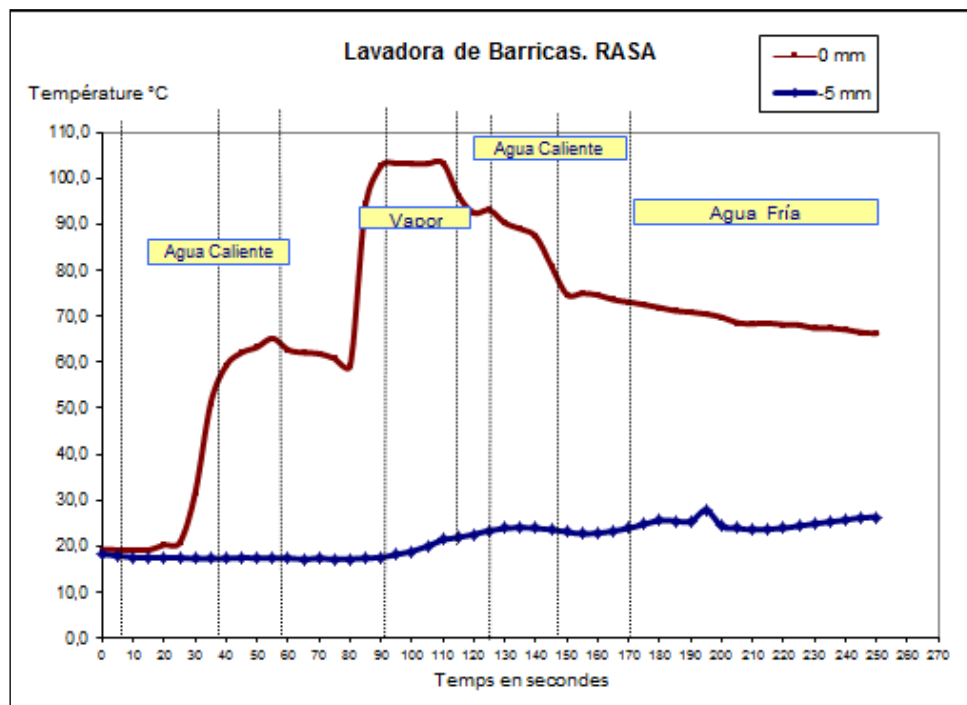


Figure 7 – Courbe de température du bois des barriques enregistrées en surface (0 mm) et en profondeur (-5 mm) au cours du protocole de lavage-désinfection de la cave RASA

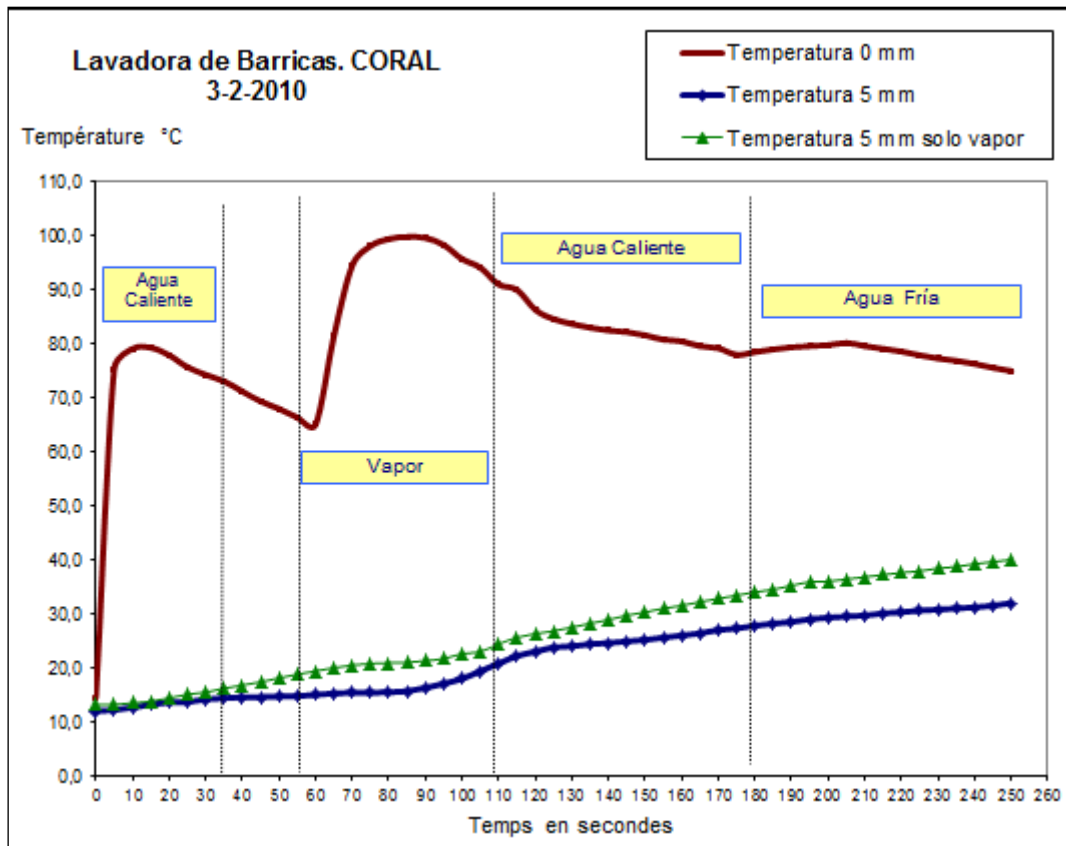


Figure 8 – Courbe de température du bois des barriques enregistrées en surface (0 mm) et en profondeur (-5 mm) au cours du protocole de lavage-désinfection de la cave CORAL avec une combinaison eau-chaude vapeur ou seulement de la vapeur

On constate que, quelle que soit la cave considérée, pour des barriques entrant au lavage entre 17 et 22°C, l'équipement et la combinaison de cycles, pour une durée similaire de traitement, le bois à 5 mm de profondeur ne permettent jamais d'atteindre la température de 30°C, quelle que soit la combinaison eau chaude-vapeur employée ; l'utilisation de la vapeur seule pendant 250 secondes permet d'atteindre seulement 40°C sans laver pour autant la barrique.

En conclusion, aucun des protocoles employés couramment à ce stade ne permet de garantir une désinfection à cœur des barriques en particulier dans l'objectif d'éliminer des levures de contamination du genre *Brettanomyces/Dekkera*.

Si en surface on peut être certain d'une désinfection thermique parfaite, à 5 mm de profondeur, limite approximative du front d'humectation par le vin, les températures produites par le système de lavage-désinfection auront plus tendance à activer le développement des germes qu'à les détruire !

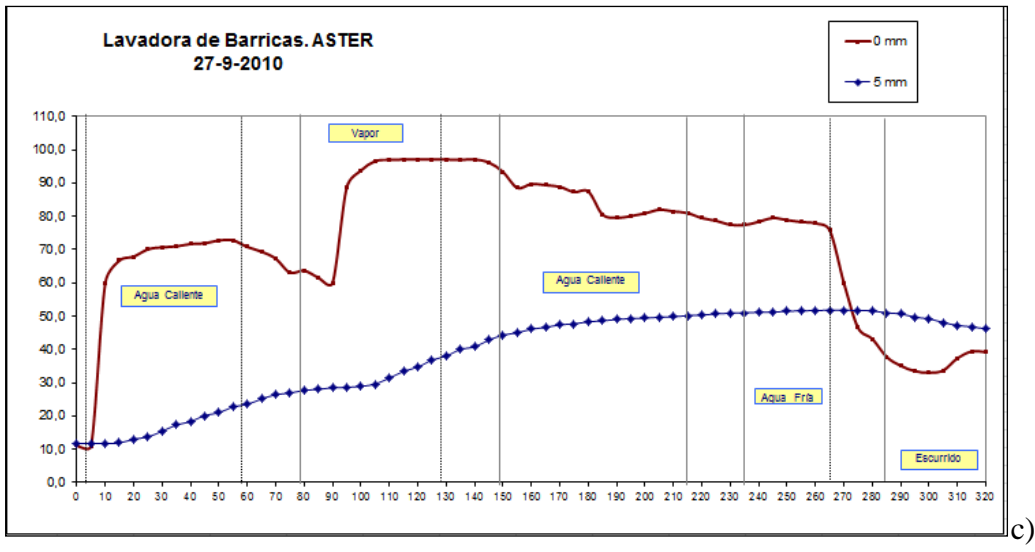
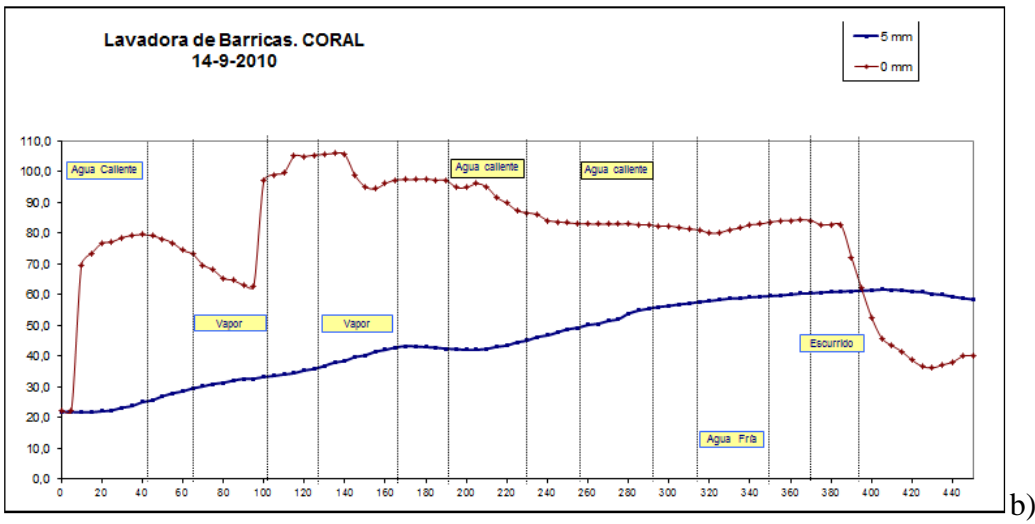
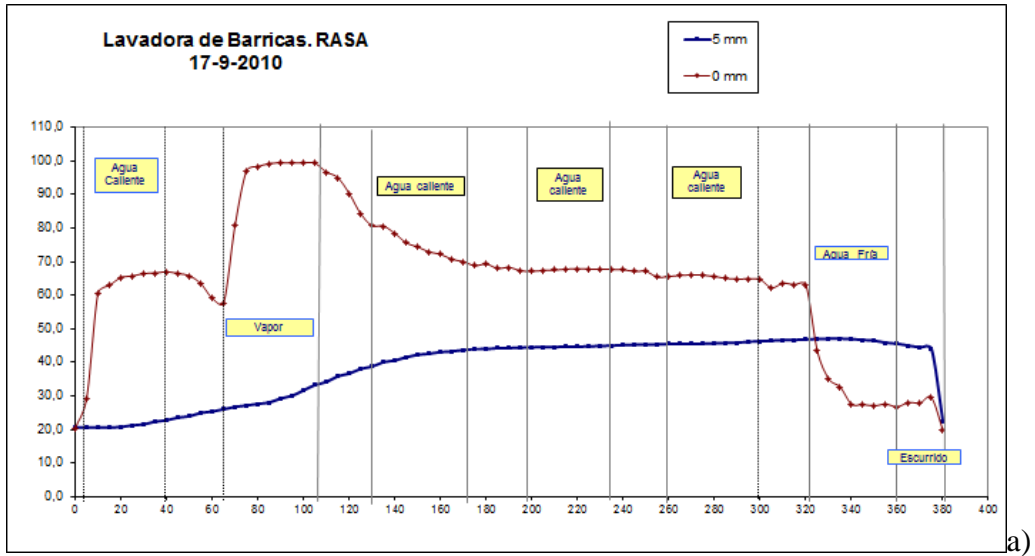


Figure 9 – Cinétiques d’augmentation de la température des barriques au cours des nouveaux cycles de lavage-désinfection expérimentés

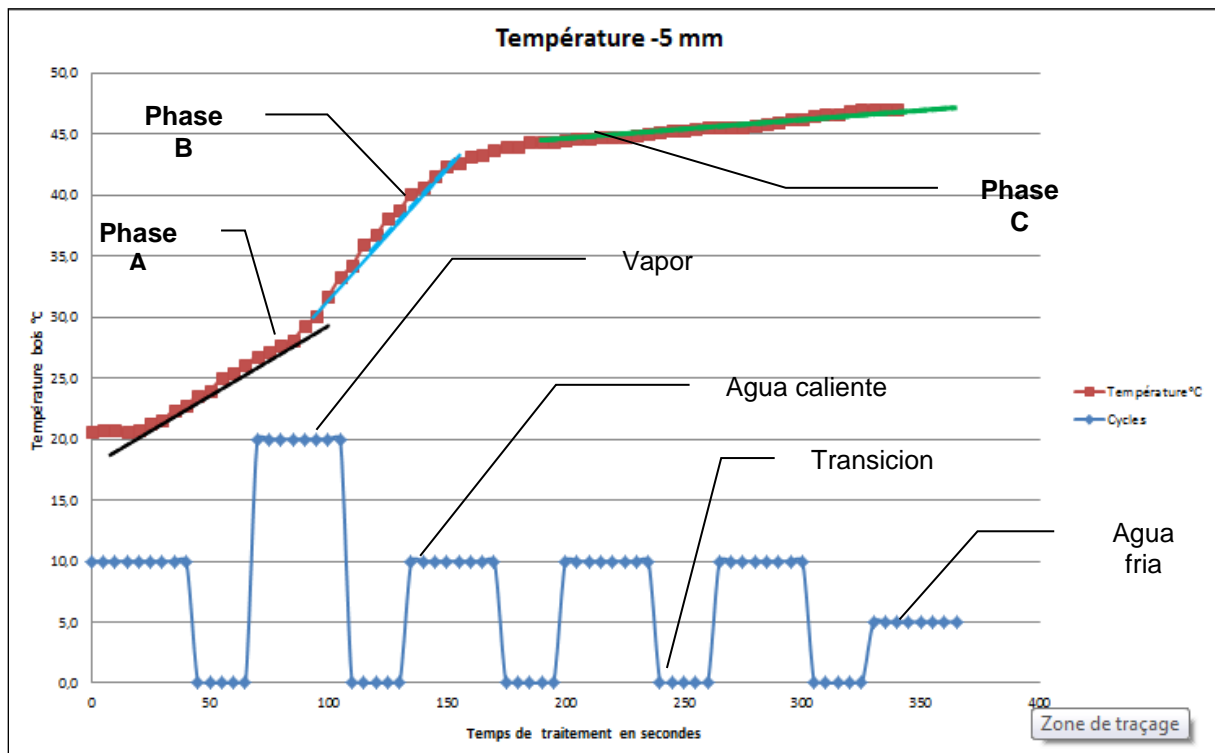
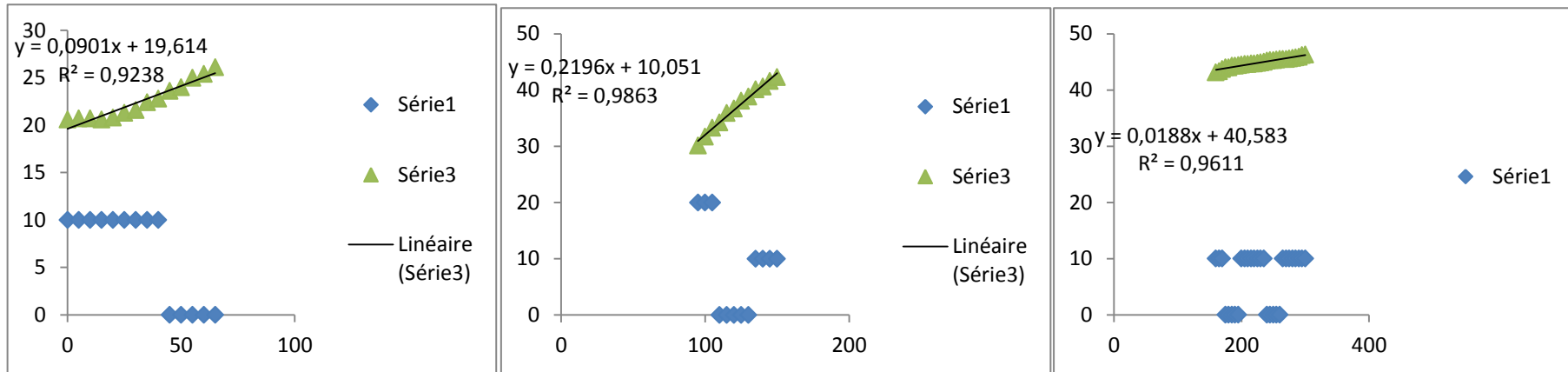


Figure 10 – Cinétique et décomposition en trois phases de l'élévation de la température du bois à 5 mm de profondeur dans les douelles pour leur désinfection thermique



Phase A

Phase B

Phase C

Figure 11 – Détermination de ax pour chaque phase du protocole de lavage expérimenté ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ à -5 mm de profondeur)

(AC : agua caliente, - : transicion, V : vapor, AF : agua fria)

Tableau III - Caractéristiques des différents types de protocoles expérimentés

Cave	Programme expérimenté	Durée des cycles (s)	Temps de transition (s)	Temps total De Traitement (s)	Température de départ ($^{\circ}\text{C}$)	Température Maximum atteinte à -5 mm ($^{\circ}\text{C}$)	Séjour bois -5mm à $T^{\circ}>50^{\circ}\text{C}$ (s)	ax ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ à -5 mm)		
								Phase A	Phase B	Phase C
RASA	AC-V-AC-AC-AF	40	20	330	20	47,1	0	0,090	0,220	0,019
ASTER	AC-V-AC-AF	50	20	265	11	51,8	75	0,203	0,323	0,073
CORAL	AC-V-V-AC-AF	45	15	360	22	58,2	>200	0,066	0,169	0,066

Les temps de traitement sont manifestement trop courts. La température de l'eau de lavage de 67°C est un peu faible ; il y a manifestement une grande déperdition thermique entre le centre de production centralisée (sortie à 84°C) et le point d'usage (67°C).

3- Modification expérimentale des protocoles de lavage et de désinfection

Nous avons procédé à une modification des cycles de lavage-désinfection à la vapeur en utilisant exactement le même matériel des différentes caves et en augmentant le temps global de traitement et le temps de certains cycles pour étudier leur impact sur (i) la courbe de montée en température, (ii) la température maximale atteinte par la bois à la profondeur de 5 mm, (iii) le temps de séjour du bois à une température supérieure à 50°C permettant d'assurer la désinfection à cœur des barriques.

La figure 9 illustre les différentes cinétiques d'augmentation de la température des barriques selon différentes conditions de travail. Le tableau III résume les conditions opératoires et les performances de chaque protocole pour augmenter la température des barriques en profondeur et réaliser une désinfection performante.

Dans la figure 10, on schématise globalement la cinétique d'augmentation de la température du bois à 5 mm de profondeur en distinguant trois phases successives :

- Phase A : on commence le nettoyage à l'eau chaude à 67°C (notée AC) avec un cycle variant de 20 à 45 secondes, le système nécessite le déplacement de la barrique sur une deuxième tête d'injection de la vapeur d'où un temps de transition ;
- Phase B : après le ou les cycles de lavage à l'eau chaude, on injecte de la vapeur (notée V) pendant 20 à 40 secondes par cycles ;
- Phase C : il n'y a plus d'injection d'eau chaude ou de vapeur, éventuellement un rinçage final à l'eau froide (notée AF), mais la température continue à augmenter en profondeur en raison de l'inertie thermique propre au bois de chêne pendant plusieurs dizaines de secondes éventuellement.

Ces trois phases possèdent leurs propres caractéristiques cinétiques. Une modélisation linéaire de l'augmentation de la température (figure 11) permet de déterminer la pente d'augmentation de la température du bois à 5 mm *ax* de chaque phase (en °C.s⁻¹).

Enfin, on constate à l'aide de ces trois modèles expérimentaux que :

- La longueur du cycle a été plus ou moins augmentée par rapport aux pratiques anciennes mais ce n'est pas ce paramètre qui permet de contrôler le mieux l'augmentation de la température du bois ;
- L'étude en décomposant le phénomène d'échauffement du bois des barriques en trois phases permet de modéliser la cinétique de désinfection thermique du bois :
 - La phase A correspondant au lavage à l'eau chaude se traduit par une élévation assez lente de la température en profondeur (*ax* avec l'essai ASTER est plus élevée car la barrique est au départ plus froide). La pente d'échauffement varie entre 0,07 et 0,20 °C.s⁻¹ ;
 - La phase B correspondant à l'injection de vapeur à 100°C permet d'augmenter fortement la pente d'échauffement après une première mise en température par l'eau chaude (0,17 à 0,32 °C.s⁻¹) ;
 - La phase C correspond à la pénétration lente de la température après arrêt du chauffage du bois par injection d'eau chaude ou de vapeur. En raison de la forte inertie thermique du bois cette élévation est relativement faible (0,02 à 0,07 °C.s⁻¹) mais elle n'est pas du tout négligeable car elle se prolonge dans le temps sans aucune intervention sur la barrique ;
- L'apport d'eau froide en fin de cycle ne sert à rien, il affecte seulement la partie superficielle de la barrique mais ne refroidit pas significativement la masse de la barrique.

Si l'on compare les trois modalités expérimentées, le traitement RASA (AC-V-AC-AC-AF) dure 330 s, les pentes d'échauffement sont tout à fait satisfaisantes mais la température maximum atteinte à 5 mm de profondeur n'atteint pas 50°C : aucune désinfection à cœur ne peut être garantie avec cette modalité.

Le traitement ASTER (AC-V-AC-AF) est plus court (265 s), avec des durées de cycle de 50s contre 40s précédemment, et permet d'échauffer rapidement la barrique en profondeur avec une durée de maintien au-dessus de 50°C satisfaisante (75s). La désinfection obtenue doit être satisfaisante.

Le traitement CORAL (AC-V-V-AC-AF) est le plus long (360s) avec une durée de cycle 45s, il permet un échauffement assez lent mais qui aboutit à une température maximum dépassant 55°C avec un temps de maintien au-delà du seuil de destruction thermique très long (> 200s) garantissant une bonne désinfection mais en utilisant 90 s d'injection de vapeur.

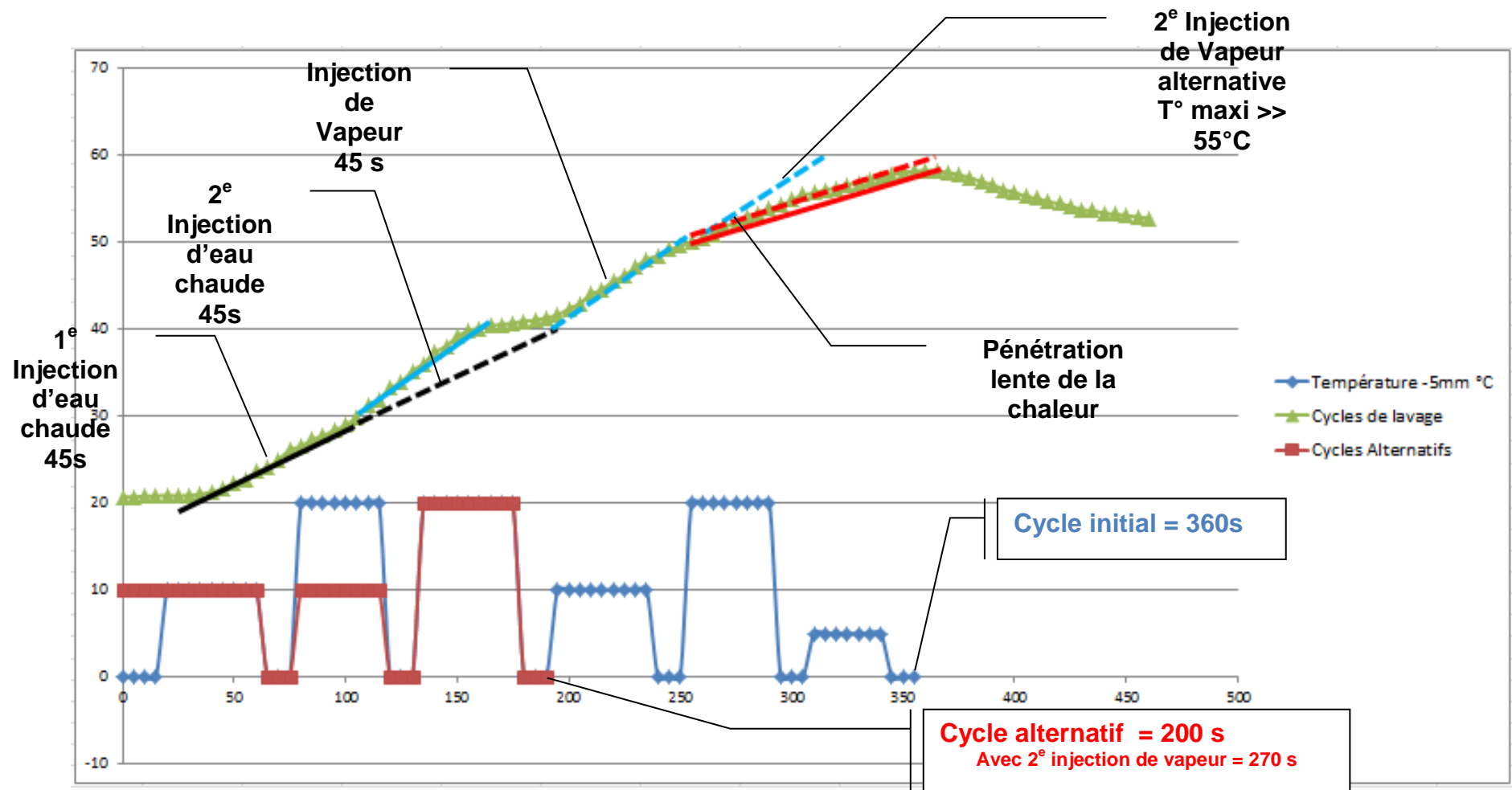


Figure 12 – Schéma alternatif de traitement des barriques avec le protocole CORAL en utilisant les pentes d'échauffement ax liées à chaque phase d'injection de l'eau chaude ou de la vapeur

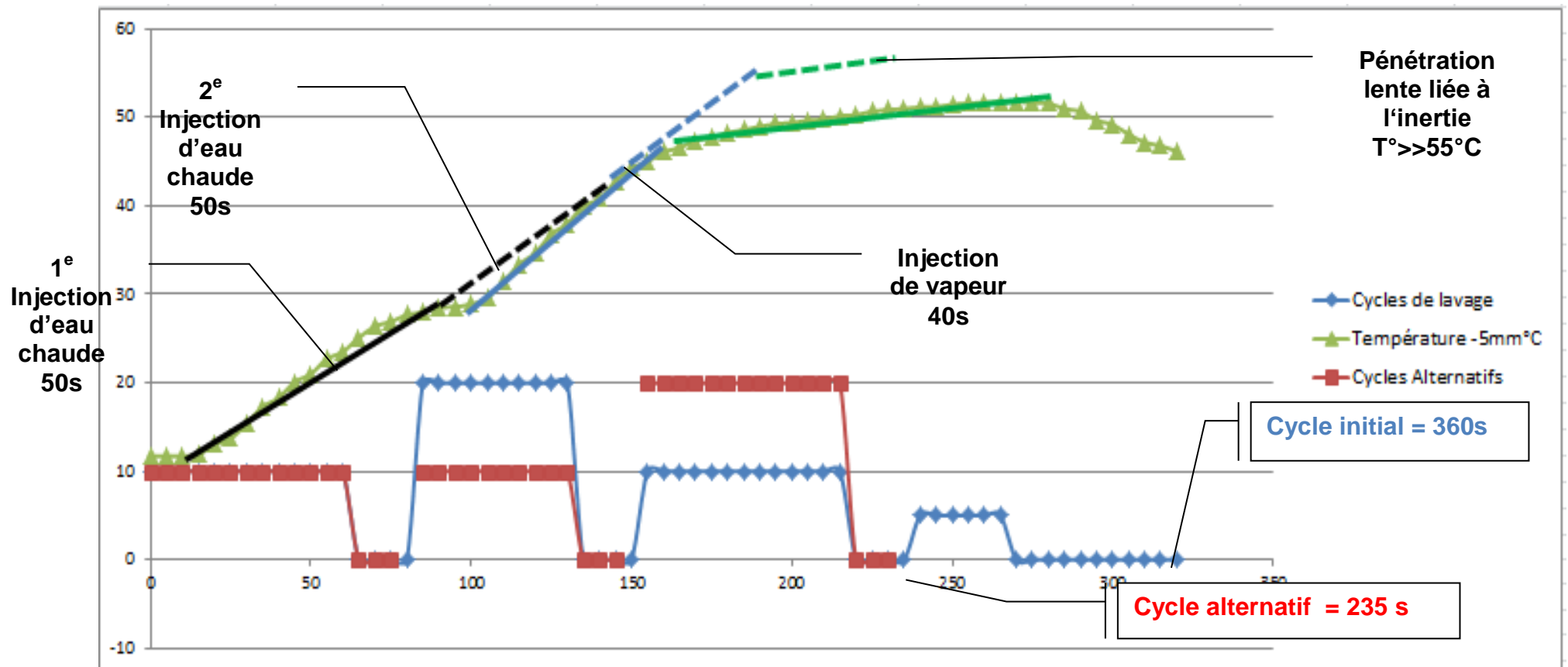


Figure 13 – Schéma alternatif de traitement des barriques avec le protocole ASTER en utilisant les pentes d'échauffement αx liées à chaque phase d'injection de l'eau chaude ou de la vapeur

Par rapport aux méthodes employées précédemment, il apparaît parfaitement possible de désinfecter avec les contraintes techniques des équipements existants en utilisant une combinaison et une durée de cycles adaptées. Il est cependant possible d'améliorer ces performances en limitant la consommation d'eau et la dépense énergétique.

- 4- Optimisation des conditions d'utilisation du matériel en place pour obtenir une meilleure désinfection grâce au protocole BARREL CHECK EXCELL®

Les figures 12 et 13 illustrent les modifications de protocoles de travail qui découlent des performances de chauffage mesurées dans les exemples précédents. Ainsi, en prolongeant les échauffement prévisibles liées à chaque phase de traitement thermique (injection d'eau chaude ou de vapeur) et en tenant compte de l'inertie d'échauffement du bois, la modification de l'enchaînement des cycles permettrait avec les protocoles CORAL ou ASTER de réduire à la fois le temps total de traitement (- 45%), la consommation d'eau (suppression d'un cycle d'eau et suppression du cycle eau froide) et le bilan de consommation énergétique (suppression d'un cycle de vapeur en allongeant les cycles d'injection de l'eau chaude à 45-50s et de la vapeur à 40-45s).

Dans tous les cas ont atteint facilement et rapidement le seuil de destruction thermique de *Brettanomyces/Dekkera*. A l'approche de ce seuil, il est inutile de prolonger le traitement car la pénétration lente de la température sera suffisante pour atteindre et même dépasser le seuil de 55°C pendant plus de 25s qui doit permettre une désinfection à cœur (-5 mm et au-delà) de la barrique en moins de 240 s, mouvement de la barrique sur l'auto-laveur compris.

Le remplissage de la barrique lavée et nettoyée ne se faisant rarement immédiatement, son refroidissement naturel sera suffisant pour ne pas échauffer le vin soutiré. L'utilisation d'eau froide est alors parfaitement inutile. En cas de remplissage immédiat, cette option est toujours envisageable.

III- Conclusions

Les études en conditions réelles effectuées ont permis de démontrer que les conditions mises en œuvre jusque-là dans les différentes caves permettaient sans doute un lavage macroscopiquement satisfaisant mais ne garantissait pas une désinfection en profondeur dans le bois des barriques. En considérant seulement une profondeur de 5 mm, niveau correspondant à peu près au front d'humectation du bois par le vin, l'élévation de la température obtenue à l'issue des différents protocoles employés ne permettait pas de désinfecter les barriques d'une éventuelle contamination par *Brettanomyces/Dekkera*, levure de contamination ciblée particulièrement dans ce travail, mais pas non plus vis-à-vis d'autres types de germes comme les bactéries acétiques ou lactiques...

L'étude des cinétiques de chauffage des barriques par l'eau chaude et la vapeur à disposition dans ces caves et l'étude de différentes combinaisons d'eau chaude et de vapeur pour des cycles de durées variables a permis de modéliser assez facilement l'échauffement du bois en profondeur en vue d'utiliser la Destruction Thermique des Microorganismes comme outil de désinfection de routine. La prise en compte des données de destruction thermique propre à *Brettanomyces/Dekkera* en phase liquide, solide et en présence d'éthanol, a permis d'approcher les valeurs DT et Z permettant de fixer un barème de désinfection compatible avec les équipements à disposition et avec la productivité des chantiers de soutirage et de nettoyage.

La modélisation BARREL CHECK EXCELL® permet de montrer simplement qu'il est possible d'atteindre, sur barrique froide ou pas (11 ou 20°C par exemple), des élévations rapides de la température permettant de garantir une désinfection à cœur du bois des barriques tout en réduisant simultanément le temps de travail, la consommation d'eau et la dépense énergétique.

Enfin, il conviendrait de s'interroger sérieusement sur les conditions de génération et de recyclage de l'eau chaude et accessoirement de la vapeur pour éviter des déperditions thermiques qui paraissent élevées entre le point de génération et la barrique.

Enfin le rinçage final à l'eau froide ne paraît aucunement ou très rarement justifié, tant du point de vue du lavage qu'à *fortiori* de la désinfection. Nos conclusions préconisent simplement son abandon. Globalement, dans les conditions présentées dans ce travail, on devrait pouvoir améliorer la productivité du chantier de lavage-désinfection de 40-45% et limiter la consommation d'eau dans les mêmes proportions, voire même plus si de l'eau plus chaude était à disposition sous respect que la vitesse de rotation et la superficie balayée par les têtes rotatives en place soient suffisantes.