
EVALUATION DU DEPISTAGE DES MAMMITES PAR LA CONDUCTIVITE ELECTRIQUE DU LAIT

THESE
pour obtenir le grade de
DOCTEUR VETERINAIRE

DIPLOME D'ETAT

*présentée et soutenue publiquement le 17 décembre 2009
devant l'Université Paul-Sabatier de Toulouse*

par
Sébastien André JACQUINET
Né le 05 avril 1984 à NANCY (Meurthe et Moselle)

Directeur de thèse : M. le Professeur Dominique BERGONIER

JURY

PRESIDENT :
M. Henri DABERNAT

Professeur à l'Université Paul-Sabatier de TOULOUSE

ASSESEUR :
M. Dominique BERGONIER
Mme. Nicole HAGEN-PICARD

Maître de Conférences à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE
Maître de Conférences à l'Ecole Nationale Vétérinaire de TOULOUSE

Remerciements

A notre Président de thèse,

A Monsieur le Professeur Henri DABERNAT

Professeur des Universités
Praticien hospitalier
Bactériologie – Hygiène

Qui nous a fait l'honneur d'accepter la présidence de notre jury de thèse.
Hommages respectueux.

A notre jury de thèse,

A Monsieur le Docteur Dominique BERGONIER,

Maître de conférences, de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse

Pathologie de la reproduction

Pour son suivi lors des travaux d'expérimentations et lors de la rédaction de la présente thèse.

Qu'il veuille bien trouver ici l'expression de notre vive gratitude et notre profond respect.

A Madame le Professeur Nicole HAGEN-PICARD,

Professeur, de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse

Pathologie de la reproduction

Qui nous a fait l'honneur de participer à notre jury de thèse.

Qu'elle veuille bien trouver ici l'expression de notre profond respect.

Dédicaces

A mes parents, merci pour votre « coaching », vos encouragements, votre soutien tout simplement.

A Mamie et mes autres Grands Parents, soyez fiers de votre petit-fils. Je regrette de n'avoir pu partager ce moment avec vous tous.

A ma sœur Céline et mon frère Rémi, merci pour tous les bons moments passés ensemble.

A Julien et Pierre, sans qui les 5 années passées à l'ENVT auraient été moins drôles.

A Katia, Fred et Camille, merci pour votre amitié.

A Marion, un énorme merci pour tout ton soutien, ton aide, ta patience et tout ton amour.

Je remercie chaleureusement Chantal Géraud pour son aide précieuse dans la réalisation des étapes administratives réalisées sur Toulouse. Un grand merci également à tous ceux qui ont participé à la relecture de ce manuscrit ; Maman, Céline et Marion. Merci à Rémi pour son aide informatique et à toutes les personnes qui ont participé, de près ou de loin, à l'amélioration de ma thèse.

-Table des matières-

<i>Introduction</i>	17
<i>Première partie : Etude bibliographique</i>	19
1. Outils de détection des mammites mis à disposition des éleveurs	19
1.1. Culture bactériologique	20
1.2. Comptages cellulaires somatiques individuels	20
1.2.1. Définition.....	20
1.2.2. Comptages cellulaires somatiques et mamelle saine	20
1.2.3. Comptages cellulaires somatiques et mamelle infectée	21
1.2.4. Autres facteurs de variation des comptages cellulaires	21
1.2.5. Corrélation entre comptages cellulaires et bactériologie	22
1.2.6. Comptages cellulaires et méthode de détection des mammites	23
1.3. Autres indicateurs de l'inflammation mammaire utilisables pour la détection des mammites [61, 72]	24
1.3.1. NAGase	24
1.3.2. Haptoglobine et Serum Amyloid A	25
1.3.3. Autres	25
1.4. Conductivité électrique du lait	25
1.4.1. Informations disponibles pour les éleveurs	26
1.4.2. Informations disponibles dans la presse scientifique	26
2. La conductivité électrique du lait comme moyen de détection des mammites chez la vache	27
2.1. Définition de la conductivité électrique	27
2.2. Conductivité électrique et composition du lait	28
2.3. Conductivité électrique du lait de vache saine	29
2.4. Conductivité électrique du lait, héritabilité et corrélation génétique	30
2.4.1. Héritabilité	30
2.4.2. Corrélation génétique de la conductivité et des mammites.....	30
2.4.3. Corrélation génétique de la conductivité et des comptages cellulaires du lait.....	31
2.5. Autres facteurs que les mammites influençant la conductivité du lait	31
2.5.1. Température.....	33
2.5.2. Numéro de lactation.....	34
2.5.3. Stade de lactation.....	35
2.5.4. Fraction du lait.....	36
2.5.5. « Race »	37
2.5.6. Alimentation	38
2.5.7. Intervalle entre traites	38
2.5.8. Stade physiologique et maladies générales.....	39
2.5.9. Bilan	39
2.6. Mammites et conductivité du lait	40
2.6.1. Mécanismes	40
2.6.2. Rapidité de la réponse.....	40
2.6.3. Type d'infection	41
2.6.4. Type de pathogène.....	42
2.6.5. Prévalence des mammites.....	43
2.7. La conductivité « en ligne »	44

2.7.1. Contexte et besoins des éleveurs	44
2.7.2. Principe des conductimètres en ligne.....	45
2.7.3. Variabilité des systèmes	46
2.8. La conductivité avec appareils de mesure portatifs.....	47
2.8.1. Besoins des éleveurs.....	47
2.8.2. Etude bibliographique.....	47
3. Bilan des études sur la conductivité électrique comme moyen de détection des mammites dans la littérature.....	48
Deuxième partie : Etude expérimentale	49
1. Objectif de l'étude.....	49
2. Matériels et méthodes.....	49
2.1. Description et mode d'emploi des appareils et des techniques	49
2.1.1. Le California Mastitis Test (CMT).....	49
2.1.2. Le MAS-D-TEC® (MD-19).....	51
2.1.3. Le 4QMAST®.....	53
2.1.4. Le MMS 3010®.....	55
2.1.5. Tableau récapitulatif comparant les appareils de conductimétrie testés	57
2.1.6. Le compteur cellulaire DCC® Delaval.....	58
2.2. Le troupeau expérimental	59
2.3. Le mode opératoire et le nombre de points	59
2.4. Protocole de chaque séance	60
2.4.1. Examen clinique de la mamelle.....	60
2.4.2. Prélèvements de lait.....	60
2.5. Analyse statistique	61
2.6. Classements des résultats bruts	61
2.7. Critères d'appréciation des résultats	62
3. Résultats.....	64
3.1. Etude de répétabilité des différents appareils de conductimétrie et de la méthode de référence.....	64
3.1.1. Répétabilité des trois appareils de conductimétrie.....	64
3.1.2. Répétabilité de la méthode de référence.....	65
3.2. Résultats globaux	65
3.3. Résultats concernant le CMT.....	65
3.3.1. Résultats bruts	66
3.3.2. Critères de jugement.....	67
3.4. Résultats concernant le compteur cellulaire DCC® Delaval	68
3.4.1. Résultats bruts	68
3.4.2. Critères de jugement.....	69
3.5. Résultats concernant le conductimètre MAS-D-TEC®.....	70
3.5.1. Résultats bruts	70
3.5.2. Critères de jugement.....	72
3.6. Résultats concernant le conductimètre 4QMAST®.....	72
3.6.1. Résultats bruts	72
3.6.2. Critères de jugement.....	75
3.7. Résultats concernant le conductimètre MMS3010®.....	75
3.7.1. Résultats bruts	75
3.7.2. Critères de jugement.....	78

3.8. Détection des mammites cliniques et subcliniques	78
3.8.1. Mammites cliniques.....	78
3.8.2. Mammites subcliniques	78
3.9. Influence du niveau du seuil de la méthode de référence sur les différents critères de jugement.....	79
3.10. Influence du seuil des appareils de conductimétrie sur les différents critères de jugement	80
3.10.1. MAS-D-TEC®	81
3.10.2. 4QMAST®	81
4. Discussion.....	82
4.1. Critères de jugements des différents appareils testés	82
4.1.1. CMT	82
4.1.2. Compteur DCC® Delaval.....	82
4.1.3. MAS-D-TEC®	83
4.1.4. 4QMAST®	83
4.1.5. MMS3010®.....	84
4.2. Efficacité globale de détection des mammites chez les vaches	85
4.2.1. Récapitulatif des critères de jugements des différents appareils testés.....	85
4.2.2. Sensibilité	86
4.2.3. Spécificité	87
4.2.4. Valeurs prédictives positive et négative	87
4.2.5. Efficience des tests	88
4.2.6. Compteur cellulaire DCC® Delaval.....	88
4.2.7. CMT	90
4.2.8. Efficacité de détection des conductimètres portables	90
4.3. Valeurs absolues ou valeurs relatives.....	92
4.4. Influence du seuil de la méthode de référence sur les différents critères de jugement.....	93
4.4.1. CMT	93
4.4.2. Compteur DCC® Delaval.....	93
4.4.3. MAS-D-TEC®	94
4.4.4. 4QMAST®	94
4.4.5. MMS3010®.....	95
4.5. Influence du seuil des appareils de conductimétrie sur les différents critères de jugement	95
4.5.1. MAS-D-TEC®	95
4.5.2. 4QMAST®	96
4.6. Prévalence des mammites au sein des élevages	96
4.7. Fraction de lait testée	98
4.8. Faux positifs et faux négatifs.....	99
4.8.1. Race	100
4.8.2. Température de l'échantillon.....	100
4.8.3. Stade de lactation.....	100
4.8.4. Motifs d'hospitalisation	101
4.9. Nombre d'échantillons testés	101
Conclusion	103
-REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES-.....	105

-Liste des figures-

<i>Figure 1 : Echanges ioniques entre la cellule sécrétrice du lait et l'extérieur [6]</i>	28
<i>Figure 2 : Influence du taux de matière grasse à différentes températures sur la conductivité électrique du lait [5]</i>	29
<i>Figure 3 : Conductivité en fonction du temps au cours d'une traite chez une vache saine avec une mesure toutes les deux secondes [34]</i>	32
<i>Figure 4 : Influence de la température sur la conductance [41]</i>	34
<i>Figure 5 : Variation des CCS et de la conductivité en fonction de la parité [72]</i>	34
<i>Figure 6 : Conductivité électrique du lait issu d'une vache saine au cours d'une lactation [54]</i>	35
<i>Figure 7 : Variations de concentration (en mMol) dans le lait des ions Na⁺, K⁺ et Cl⁻ en fonction du stade de lactation [29]</i>	36
<i>Figure 8 : Concentrations en Na⁺, Cl⁻ et K⁺ dans le lait en fonction des races [29]</i>	37
<i>Figure 9 : Influence de la durée de l'intervalle entre deux traites sur la conductivité électrique et les CCS dans le cas de lait sain [29]</i>	38
<i>Figure 10 : Conductivité électrique et teneur en lactose du lait issu de trois types de quartiers : sain, mammite chronique, mammite aigüe [29]</i>	41
<i>Figure 11 : Variations de la valeur prédictive positive (à gauche) et de la valeur prédictive négative (à droite) en fonction de la prévalence des mammites subcliniques [48]</i>	44
<i>Figure 12 : Appareil de conductimétrie MAS-D-TEC® [80]</i>	51
<i>Figure 13 : Appareil de conductimétrie 4QMAST® [77]</i>	53
<i>Figure 14 : Appareil de conductimétrie MMS3010® [79]</i>	55
<i>Figure 15 : Compteur cellulaire DCC® Delaval [76]</i>	58
<i>Figure 16 : Résultats comparés du CMT et des comptages cellulaires par la méthode opto-fluoro-électronique (CIAL)</i>	66
<i>Figure 17 : Résultats comparés du CMT et des comptages cellulaires par la méthode opto-fluoro-électronique (CIAL) pour des valeurs inférieures à 1 000 000 cellules/mL</i>	67
<i>Figure 18 : Résultats comparés du CMT et des comptages cellulaires par la méthode opto-fluoro-électronique (CIAL) pour des valeurs inférieures à 400 000 cellules/mL</i>	67
<i>Figure 19 : Résultats comparés des comptages cellulaires issus du compteur cellulaire DCC® Delaval et par la méthode opto-fluoro-électronique (CIAL)</i>	68
<i>Figure 20 : Résultats comparés des comptages cellulaires issus du compteur cellulaire DCC® Delaval et par la méthode opto-fluoro-électronique (CIAL) pour des valeurs inférieures à 2 000 000 cellules/mL (CIAL)</i>	69
<i>Figure 21 : Résultats comparés des comptages cellulaires issus du compteur cellulaire DCC® Delaval et par la méthode opto-fluoro-électronique (CIAL) pour des valeurs inférieures à 400 000 cellules/mL (CIAL)</i>	69
<i>Figure 22 : Distribution des valeurs obtenues avec le MAS-D-TEC®</i>	71
<i>Figure 23 : Résultats comparés du MAS-D-TEC® et des comptages cellulaires par la méthode opto-fluoro-électronique (CIAL)</i>	71
<i>Figure 24 : Résultats comparés du CMT et des comptages cellulaires par la méthode opto-fluoro-électronique (CIAL) pour des valeurs inférieures à 1 000 000 cellules/mL</i>	72
<i>Figure 25 : Distribution des valeurs obtenues par le 4QMAST®</i>	73
<i>Figure 26 : Résultats comparés du 4QMAST® et des comptages cellulaires par la méthode opto-fluoro-électronique (CIAL)</i>	74
<i>Figure 27 : Résultats comparés du MAS-D-TEC® et des comptages cellulaires par la méthode opto-fluoro-électronique (CIAL) pour des valeurs inférieures à 1 000 000 cellules/mL</i>	74

<i>Figure 28 : Distribution des valeurs absolues obtenues par le MMS 3010®.....</i>	<i>76</i>
<i>Figure 29 : Résultats comparés du MMS3010® et des comptages cellulaires par la méthode opto-fluoro-électronique (CIAL)</i>	<i>77</i>
<i>Figure 30 : Résultats comparés du MMS3010® et des comptages cellulaires par la méthode opto-fluoro-électronique (CIAL) pour des valeurs inférieures à 1 000 000 cellules/mL.....</i>	<i>77</i>
<i>Figure 31 : Influence du choix du seuil sur la Se, Sp, VPP et VPN.....</i>	<i>81</i>
<i>Figure 32 : Variations de la sensibilité (-□-) et de la spécificité (-■-) en fonction du seuil choisi [43]</i>	<i>95</i>
<i>Figure 33 : Conductivité électrique du lait en fonction du statut infectieux et de la fraction de lait considérée [20]</i>	<i>99</i>

-Liste des tableaux-

<i>Tableau 1 : Principales modifications physiopathologiques résultant d'une mammite et donnant lieu à un type de tests de détection [29 / 36].....</i>	19
<i>Tableau 2 : Moyenne géométrique des CCS en fonction du pathogène mis en évidence [16].</i>	21
<i>Tableau 3: Répartition des articles sur la conductivité et son efficacité dans la détection des mammites chez la vache utilisés dans cette thèse</i>	27
<i>Tableau 4 : Comparaison de la conductivité électrique et des CCS dans le lait de quartiers sains [29].....</i>	37
<i>Tableau 5 : Evaluation des paramètres physiologiques sur la conductivité électrique du lait dans les premiers jets de quartiers sains [29].....</i>	39
<i>Tableau 6 : Résumé de plusieurs études sur l'influence du type de pathogène responsable de la mammite sur la conductivité électrique du lait [29]</i>	42
<i>Tableau 7 : Interprétation du CMT et correspondance avec les CCS [22, 62, 65]</i>	50
<i>Tableau 8 : Interprétation des résultats du MAS-D-TEC® (d'après la notice d'utilisation)...</i>	52
<i>Tableau 9 : Interprétation des résultats de l'appareil 4QMAST® (d'après la notice d'utilisation)</i>	55
<i>Tableau 10 : Interprétation des résultats de l'appareil MMS3010® (d'après la notice d'utilisation)</i>	57
<i>Tableau 11 : Récapitulatif des caractéristiques des trois conductimètres portables</i>	57
<i>Tableau 12 : Interprétation des résultats de l'appareil DCC® Delaval (d'après la notice d'utilisation)</i>	59
<i>Tableau 13 : Seuils retenus pour les différents appareils testés</i>	62
<i>Tableau 14 : Critères d'appréciation des résultats</i>	63
<i>Tableau 15 : Etude de répétabilité sur du lait sain et du lait mammitieux du 4QMAST® et du MAS-D-TEC®</i>	64
<i>Tableau 16 : Etude de répétabilité de la méthode de référence.....</i>	65
<i>Tableau 17 : Classement des résultats des valeurs absolues des différents tests par rapport au Somacount® (CIAL SO)</i>	65
<i>Tableau 18 : Comparaison des résultats du CMT et des CCS par la méthode opto-fluoro-électronique (CIAL).....</i>	66
<i>Tableau 19 : Critères de jugement du CMT.....</i>	67
<i>Tableau 20 : Comparaison des résultats du compteur DCC® Delaval et des CCS par la méthode opto-fluoro-électronique (CIAL)</i>	68
<i>Tableau 21 : Critères de jugement du compteur DCC® Delaval.....</i>	70
<i>Tableau 22 : Comparaison des résultats du conductimètre MAS-D-TEC® et des CCS par la méthode opto-fluoro-électronique (CIAL)</i>	70
<i>Tableau 23 : Critères de jugement du conductimètre MAS-D-TEC®</i>	72
<i>Tableau 24 : Comparaison des résultats du conductimètre 4QMAST® et des CCS par la méthode opto-fluoro-électronique (CIAL)</i>	73
<i>Tableau 25 : Critères de jugement du conductimètre 4QMAST®.....</i>	75
<i>Tableau 26 : Comparaison des résultats du conductimètre MMS3010® et des CCS par la méthode opto-fluoro-électronique (CIAL)</i>	75
<i>Tableau 27 : Critères de jugement du conductimètre MMS3010®</i>	78
<i>Tableau 28 : Critères de jugement des différents appareils testés pour la détection des mammites subcliniques (valeurs absolues)</i>	79
<i>Tableau 29 : Critères de jugement des différents appareils testés pour la détection des mammites subcliniques (valeurs relatives)</i>	79
<i>Tableau 30 : Critères de jugement en fonction du seuil de comptages cellulaires.....</i>	80

<i>Tableau 31 : Variations de Se, Sp, VPP et VPN de l'appareil MAS-D-TEC® en fonction du seuil de la diode choisi</i>	81
<i>Tableau 32 : Critères de jugement en fonction du seuil du 4QMAST®.....</i>	82
<i>Tableau 33 : Critères de jugement des différents appareils testés (valeurs absolues) par rapport à la méthode opto-fluoro-électronique (CIAL)</i>	86
<i>Tableau 34 : Critères de jugement des différents appareils testés (valeurs relatives) par rapport à la méthode opto-fluoro-électronique (CIAL)</i>	86
<i>Tableau 35 : Valeurs de Se, Sp, VPP et VPN pour les comptages cellulaires par rapport à la bactériologie du lait d'après la bibliographie</i>	89
<i>Tableau 36 : Valeurs de Se, Sp, VPP et VPN pour le CMT d'après la bibliographie.....</i>	90
<i>Tableau 37 : Valeurs de Se, Sp, VPP et VPN pour différents conductimètres portables d'après la bibliographie</i>	91

Introduction

Les mammites sont considérées comme l'une des maladies les plus coûteuses dans les élevages laitiers français (coût moyen de 26,76 € par vache et par an en France d'après une étude réalisée sur 248 élevages du Pays de la Loire sur la période 1995-1997 [24]). Des études françaises plus récentes estiment l'impact total pour l'année 2000 à plus de 76 € par vache présente-année, soit environ 1 € pour 100 litres de lait [68] ; dans d'autres pays producteurs de lait, les estimations par vache et par an sont d'environ 98,5 € en Norvège, 49 € en Finlande [30] et 79 € aux Etats-Unis [64].

L'impact financier est d'une part dû aux pertes (= non gain prévu) représentées par la baisse de production laitière (directe et indirecte, comme le lait écarté non commercialisé), à la baisse de paiement du lait à la qualité, à l'impact sur l'avenir reproducteur de l'animal ainsi que sur sa longévité et, pour finir, aux réformes anticipées. D'autre part, il est dû aux coûts (néo-dépenses induites) tels que les frais vétérinaires et de traitements, et parfois même l'euthanasie de l'animal. L'une des solutions au problème est un dépistage – ou un diagnostic – précoce et performant. En effet, il permet de mettre en œuvre un traitement plus efficace, voire d'autres mesures de gestion sanitaire : ségrégation des animaux excréteurs, réforme dans certains cas, ...

Il existe actuellement de nombreuses méthodes de surveillance et de dépistage des mammites qui ont fait leurs preuves dans ce domaine. C'est le cas des comptages de cellules somatiques collectifs ou individuels (CCS). Ces derniers donnent une bonne image de l'état sanitaire des mamelles, mais sont mis à la disposition des éleveurs une fois par mois seulement et uniquement pour les adhérents des syndicats de contrôle laitier (environ 66,8% des élevages de lait de vache en 2008 ce qui correspond à 55 177 élevages et 2 702 681 vaches contrôlées en France [75]). De plus, d'après Shook *et al.* (1994) [74], le schéma mensuel utilisé ne permet de détecter que 10 à 20% des infections qui seraient susceptibles de guérir uniquement grâce au système immunitaire de l'animal et sans aucune intervention médicamenteuse humaine.

Il est reconnu [d'après Milner *et al.* (1997), cité par [4]] que la précocité de détection des infections intra-mammaires est un facteur qui favorise une guérison rapide du fait d'une antibiothérapie plus précoce. En effet, plus on traite tôt, plus on limite l'apparition de complications. Plus un animal infecté sera détecté précocement, plus vite il pourra être isolé, limitant ainsi les risques de transmission et de dissémination de germes par exemple. Ainsi,

les outils permettant une mise en évidence la plus précoce possible intéressent les producteurs laitiers mais aussi tous les autres acteurs de la filière lait.

Depuis 1911 (Munch-Peterson E. (1938), cité par [73]), la conductivité électrique du lait est apparue comme un moyen possible de détection des mammites. Les données disponibles dans la littérature sont parfois contradictoires. Certains systèmes font partie intégrante de la machine à traire ou du robot de traite (méthode dite « en-ligne »), alors que d'autres sont portatifs. Il existe très peu d'information scientifique sur l'efficacité réelle pour la détection de ce dernier type d'appareil, c'est pourquoi nous avons souhaité réaliser une synthèse bibliographique sur le sujet à partir de la littérature scientifique. Dans un second temps, il nous a paru opportun de proposer une étude comparative de plusieurs de ces appareils tout en se référant aux méthodes de détection ayant largement fait leurs preuves dans le domaine : les comptages individuels de cellules somatiques et le California Mastitis Test (CMT).

Première partie : Etude bibliographique

1. Outils de détection des mammites mis à disposition des éleveurs

Lorsqu'une mamelle ou plus précisément un quartier est infecté, de nombreuses modifications physiopathologiques surviennent, ce qui rend possible divers dosages ou dénombrements qui cependant doivent être évalués du point de vue de leurs performances pour la détection indirecte des mammites. Au fur et à mesure des années et de l'avancée des connaissances scientifiques dans le domaine, une grande variété de tests ont ainsi été proposés qui diffèrent de par leur sensibilité, spécificité, valeurs prédictives, simplicité, rapidité et coût [36].

Tableau 1 : Principales modifications physiopathologiques résultant d'une mammite et donnant lieu à un type de tests de détection [29 / 36]

Modifications de composition du lait causées par	Tests et méthodologie
Le système immunitaire de l'animal	Comptage Cellulaire Somatique : <ul style="list-style-type: none">- Observation directe au microscope- Analyse automatique de la taille des particules cellulaires- Coloration fluorescente des noyaux cellulaires- Tests d'augmentation de viscosité- Dosage chimique de l'ADN- Dosage de métabolite cellulaire (ATP)
La réduction des capacités de synthèse de la glande mammaire	Dosage du lactose : <ul style="list-style-type: none">- Colorimétrie- Méthode infra-rouge
Les dommages cellulaires et la perméabilité des capillaires sanguins	Serum Albumine Bovine : <ul style="list-style-type: none">- Immunodiffusion- Immunoélectrophorèse Na, K, Cl : <ul style="list-style-type: none">- Photométrie de flamme (Na⁺, K⁺)- Chimie (Cl⁺)- Electrodes spécifiques des ions- Mesure de conductivité Enzymes : <ul style="list-style-type: none">- Catalase- N-acetyl-β-D-glucosaminidase- LDH

1.1. Culture bactériologique

Cette méthode directe est la méthode de référence par excellence puisqu'elle permet de savoir si des germes sont présents dans le lait et ensuite de les identifier. Malheureusement, cet outil présente plusieurs inconvénients : un prix relativement important (entre 15 et 22 € [3]), des contraintes de prélèvements (conditions d'asepsie, température et délai d'acheminement des échantillons) et un délai d'obtention des résultats assez long. Ainsi, cette méthode bien qu'efficace ne peut être utilisée en routine de façon systématique ou exhaustive par les éleveurs.

1.2. Comptages cellulaires somatiques individuels

1.2.1. Définition

Les comptages cellulaires somatiques individuels (CCSi) sont utilisés comme indicateurs d'infections intra-mammaires depuis les années 60. Ils ont été inclus comme une composante de la définition d'une mammite [61].

Lorsqu'il y a une infection au sein du parenchyme mammaire, comme partout ailleurs dans l'organisme, une réaction inflammatoire se met en place entraînant un afflux marqué de neutrophiles sanguins vers le lieu de l'infection, dans notre cas vers la mamelle.

Les CCSi correspondent alors au dénombrement des leucocytes et, de façon minoritaire, des cellules épithéliales de la glande mammaire présentes dans le lait. Ils s'expriment en cellules/mL de lait.

1.2.2. Comptages cellulaires somatiques et mamelle saine

Bien que certaines études [22, 63] aboutissent à des conclusions différentes, on considère que lorsque la mamelle est saine, la population leucocytaire est composée de 66 à 88% de macrophages, de 10 à 27% de lymphocytes, de 1 à 11% de neutrophiles, et de 0 à 7% de cellules épithéliales [61, 62, 65].

D'après Serieys *et al.* (1985) [70], dans 80% des cas les mamelles saines ont des valeurs de comptage cellulaire ne dépassant pas les 100 000 cellules/mL et Schukken *et al.* (2003) [67] rapportent que le niveau des CCS dans un quartier sain est de 70 000 cellules/mL en moyenne.

1.2.3. Comptages cellulaires somatiques et mamelle infectée

Lors de mammite, ce sont les neutrophiles qui deviennent majoritaires (90%) et le comptage cellulaire augmente fortement [61, 62, 63, 65]. L'augmentation peut être plus ou moins importante en fonction de l'agent pathogène responsable de l'infection et certaines valeurs de CCS dépassent le million de cellules /mL.

Tableau 2 : Moyenne géométrique des CCS en fonction du pathogène mis en évidence [16]

Pathogène mis en cause	Moyenne géométrique des CCS (cellules/mL)
Coliformes	1 151 000
<i>Streptococcus uberis</i>	1 024 000
<i>Streptococcus agalactiae</i>	857 000
<i>Streptococcus dysgalactiae</i>	547 000
<i>Staphylococcus aureus</i>	357 000
Staphylocoques autre que <i>S. aureus</i>	138 000
<i>Corynebacterium bovis</i>	105 000

1.2.4. Autres facteurs de variation des comptages cellulaires

Nous avons dit précédemment que chez la vache, le CCSi était principalement influencé par le statut infectieux de la glande mammaire. Bien que dans une moindre mesure, les CCS peuvent varier indépendamment de toute infection en fonction de l'âge ou du numéro de lactation [2, 10, 67], du stade de lactation [10, 67, 72], de la « race » [10], de l'appareil de mesure, de la fraction de lait utilisée pour le comptage [16], de la fréquence de traite [61], de la production laitière [10, 67] et de la saison [10].

1.2.4.1. Comptages cellulaires et stade de lactation

Le nombre de cellules dans le lait augmente avec le stade de lactation [10, 67, 72], on observe notamment immédiatement après la mise bas des CCS qui sont importants mais qui diminuent rapidement jusqu'à revenir à la normale en 4 à 5 jours [61]. Vers la fin de la lactation, les CCS augmentent à nouveau mais progressivement [61].

Une étude [72] illustre cet effet de manière significative tout en précisant que l'influence de ce paramètre est plus importante dans le cas de quartiers infectés que de quartiers sains. Par exemple, on passe de 80 000 cellules/mL à 35 jours post partum à 160 000 cellules/mL à 285 jours post partum pour des quartiers sains. Pour un quartier infecté par *Staphylococcus aureus*, on passe de 234 000 cellules/mL à 1 000 000 cellules/mL [72].

Cette différence de variation entre les quartiers sains et infectés semble s'appliquer à l'ensemble des effets physiologiques susceptibles d'affecter les CCS [61].

1.2.4.2. Comptages cellulaires et intervalle entre traites

Si on passe de deux traites par jour à trois traites par jour, on observe une diminution des CCS du lait et de la proportion de vaches hautes en CCS [61]. Mais il faut faire attention car si l'intervalle entre traite est vraiment très court (4 heures et moins) on observe alors une augmentation des CCS [61].

1.2.4.3. Comptages cellulaires et rang de lactation

Les CCS augmentent également avec le rang de lactation [2, 10, 67] et donc avec l'âge de l'animal [67].

1.2.4.4. Comptages cellulaires et production laitière

En revanche les CCS diminuent avec la production laitière [10, 67], sans doute par un effet de dilution.

1.2.5. Corrélation entre comptages cellulaires et bactériologie

Il y a parfois des décalages entre le moment où la bactérie en cause est présente dans la mamelle et le moment où les CCS augmentent, puis reviennent à la normale une fois l'infection résolue. Certains auteurs ont d'ailleurs montré qu'après inoculation chez certaines vaches, on avait bien une augmentation des CCS, alors que le comptage bactérien était nul au moment de l'analyse [63].

Il n'y a pas de relation linéaire entre la bactériologie et la valeur des CCS lors d'une infection. La cinétique des comptages cellulaires est de type sinusoïdale, concomitante mais asynchrone de l'excrétion bactérienne. On peut donc avoir un dénombrement bactérien faible avec des CCS élevés et inversement, pouvant être à l'origine de discordances apparentes de résultats. Ainsi, il est tout à fait possible d'avoir une vache avec un dénombrement bactérien important et des CCS normaux (en début d'infection par exemple) et inversement (en fin d'infection) [46].

1.2.6. Comptages cellulaires et méthode de détection des mammites

1.2.6.1. Choix d'un seuil de détection

Pour utiliser les CCS dans l'objectif de distinguer un quartier sain d'un quartier infecté, il faut décider d'une valeur seuil au-delà de laquelle on considèrera le quartier comme infecté. D'après la littérature, il apparaît que le seuil permettant de minimiser le risque d'erreur serait de l'ordre de 200 000 à 250 000 cellules/mL. Avec ce seuil, on obtiendrait une sensibilité (Se) de détection d'environ 75% et une spécificité (Sp) de 90% [67]. En France, si un lait présente un comptage inférieur à 300 000 cellules/mL, celui-ci est considéré comme sain, alors que s'il est supérieur à 800 000 cellules/mL, il sera considéré comme atteint de mammite subclinique. Entre 300 et 800 000 cellules/mL, le quartier est considéré comme douteux.

Cette règle, proposée dans les années 1980, s'adresse à la détection, sur une base longitudinale (plusieurs mois), des pathogènes majeurs.

1.2.6.2. Méthode quantitative ou semi-quantitative

Sur le terrain et en routine, les comptages cellulaires peuvent être réalisés de façon quantitative avec un appareil électronique de marque Fossomatic® ou Somacount® (ou de façon semi-quantitative avec notamment le California Mastitis Test (CMT)), utilisant la méthode officielle de type opto-fluoro-électronique.

Depuis peu, les éleveurs ont à leur disposition divers appareils portables permettant l'évaluation des comptages cellulaires directement à la ferme (par exemple le compteur cellulaire DCC® Delaval illustré Figure 16), avec un résultat donné en milliers de cellules/mL, ce qui leur permet de s'affranchir des contraintes de délai d'obtention des résultats, ainsi que du rythme des mesures imposées par le contrôle laitier. Le coût d'une cassette, c'est-à-dire du consommable nécessaire à un dénombrement est d'approximativement 1,2 €, contre 0,4 € pour le coût de revient d'un comptage cellulaire individuel effectué dans le laboratoire interprofessionnel. Cependant, avec les systèmes de traite automatique robotisés, se développent des compteurs cellulaires faisant partie intégrante de la machine et entraînant une baisse du prix de revient de l'évaluation cellulaire aux alentours des 0,3 €.

L'utilisation du CMT présente de nombreux avantages. En effet, il s'agit d'un test rapide, donnant le résultat de manière instantanée, très simple d'utilisation, très bon marché (coût évalué à quelques centimes par test réalisé), et pouvant être fait directement par l'éleveur au pied de l'animal sur un grand nombre d'animaux. On peut utiliser ce test aussi bien sur du lait frais (jusqu' à 12 heures après le moment de prélèvement), que sur du lait réfrigéré (jusqu'à 36h après le prélèvement) [65].

Le seul inconvénient expliquant la non utilisation par certains éleveurs serait le caractère subjectif de la lecture et donc du résultat obtenu puisque l'opérateur doit apprécier l'intensité du gel formé.

L'utilisation précise et pratique aussi bien du compteur cellulaire DCC® Delaval que du CMT sera vue plus en détails au cours de la seconde partie de la thèse.

1.3. Autres indicateurs de l'inflammation mammaire utilisables pour la détection des mammites [61, 72]

1.3.1. NAGase

La N-acétyl- β -D-glucosaminidase est une enzyme lysosomale et cytosolique relarguée dans le lait par les neutrophiles durant la phagocytose, la lyse cellulaire et dans une moindre mesure lors de dommages subis par les cellules épithéliales. Cette enzyme est donc un indicateur de l'état d'inflammation de la mamelle et à ce titre peut être utilisée comme moyen de détection des mammites. Cette méthode est prometteuse et efficace [17] puisqu'une étude rapporte un pourcentage de faux positif (pourcentage d'animaux considérés comme infectés d'après la méthode de détection testée alors qu'en réalité ils sont sains) de l'ordre de 17% et de faux négatifs (pourcentage d'animaux considérés comme sains d'après la méthode de détection testée alors qu'en réalité ils sont infectés) de 2% [61]. Actuellement, il n'existe aucun appareil commercialisé pour en faire une utilisation routinière et d'autres études sont encore nécessaires pour parfaire la méthode.

1.3.2. Haptoglobine et Serum Amyloïd A

Il s'agit de protéines de la phase aigüe de l'inflammation qui possèdent un bon potentiel mais à l'heure actuelle trop peu d'expériences ont été réalisées. De plus, ces paramètres ne sont pas à ce jour quantifiables par une méthode en ligne, ce qui est moins intéressant pour les éleveurs disposant de systèmes de traite automatique.

1.3.3. Autres

D'autres molécules sont encore citées (ATP [17], lactose...) comme ayant un potentiel de détection des mammites chez la vache, mais de manière générale les données disponibles sont faibles quant à leur efficacité réelle. Les études dans des conditions réalistes de terrain manquent pour pouvoir évaluer précisément ce potentiel. Actuellement, aucun dispositif commercial n'est disponible, nous n'irons donc pas plus loin dans leur étude.

1.4. Conductivité électrique du lait

Comme nous l'avons dit précédemment, la conductivité électrique du lait apparaît au début des années 1900 comme un moyen de détection potentiel des mammites en élevages laitiers.

On peut se demander pourquoi la conductivité électrique du lait s'est développée ces derniers temps alors que la profession dispose depuis longtemps d'un outil simple, avec un coût relativement abordable et utilisable à grande échelle : les comptages cellulaires. L'utilisation de la conductivité peut palier à certaines lacunes de cette méthode évoquées précédemment : cinétique sinusoïdale des comptages cellulaires, délai de traitement par le laboratoire, information sur l'animal et non pas quartier par quartier, subjectivité d'interprétation dans le cas du CMT.

Avant d'étudier plus en détail le domaine de la conductivité, rappelons qu'apparaissent depuis plusieurs années sur le marché des conductimètres portables permettant selon les fabricants une détection simple, rapide et efficace des mammites, notamment des mammites subcliniques par l'éleveur lui-même, le tout pour un coût très intéressant. Certains vétérinaires sont parfois même des intermédiaires pour la vente de ce type d'appareil. Devant la multitude d'appareils (Annexe n°1 : images publicitaires obtenues sur internet) mis à la disposition des éleveurs, il nous a semblé important de faire le point sur l'information disponible et sur les performances des conductimètres portables.

1.4.1. Informations disponibles pour les éleveurs

Actuellement, la première banque de données dont une personne dispose pour obtenir une information sur un produit quelconque est Internet. Accessible au plus grand nombre, c'est donc le moyen le plus utilisé.

En me mettant à la place de l'éleveur, j'ai effectué une recherche internet (recherche effectuée le 20 janvier 2009 à partir du moteur de recherche Google®) avec les mots clés suivants : « *appareil de conductimétrie portatif, détection des mammites* ». Au total, j'ai obtenu 26 résultats obtenus, dont 5 seulement en rapport réel avec notre domaine d'utilisation. Parmi ces 5 résultats, 3 correspondaient à des publicités commerciales, 1 à une étude comparative effectuée par l'institut de l'élevage [5] et le dernier à une thèse vétérinaire intitulée « Le suivi d'élevage en troupeau bovin laitier : approche pratique ».

Une seconde recherche effectuée le 24 avril 2009 avec les mots clés suivants : « *appareil de détection des mammites* » a donné 1 190 résultats. L'analyse des 30 premiers nous amène au total à 8 références concernant des conductimètres portables (exclusivement des sites commerciaux), 4 concernant d'autres moyens de détection (mise en évidence des grumeaux et 1 appareil de mesure de conductivité en ligne), 2 forums de discussion sur le sujet des conductimètres portables.

En bilan, très peu de données concernant l'efficacité réelle de ce type d'appareils sont disponibles pour l'éleveur. La majorité des sites que l'on peut trouver sont des sites commerciaux.

1.4.2. Informations disponibles dans la presse scientifique

Afin de nous faire une idée plus précise de la fiabilité de ces appareils, nous avons recherché les données disponibles au sein de la presse scientifique. Seuls des articles en Anglais et en Français ont été recherchés en utilisant les banques de données suivantes : PubMed®, Science Direct® et les ressources de la Bibliothèque de l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse.

Les études sur la conductivité du lait sont nombreuses, notamment celles qui ont pour objectif de mettre en évidence ses capacités à être utilisée comme moyen de détection des mammites chez la vache. En revanche, les études cherchant à évaluer l'efficacité réelle de cette détection en les comparant à des méthodes de référence ayant fait leurs preuves en terme de fiabilité de

diagnostic sont beaucoup moins nombreuses. Ceci est encore plus vrai lorsqu'il s'agit d'appareils portables comparés aux appareils de mesure dits « en ligne ».

Ainsi, on a une situation totalement inversée. D'une part les éleveurs ont à leur disposition des offres commerciales abondantes mettant en avant la prétendue efficacité de ces appareils et d'autre part au sein de la communauté scientifique, très peu d'études sont disponibles sur ce sujet. Nous verrons plus en détails par la suite les conclusions de ces différentes études.

Tableau 3: Répartition des articles sur la conductivité et son efficacité dans la détection des mammites chez la vache utilisés dans cette thèse

	Articles généraux sur la conductivité électrique du lait	Articles sur l'efficacité de la conductivité en ligne dans la détection des mammites	Articles sur l'efficacité des conductimètres portables dans la détection des mammites
Total	18	21	11

Nous allons désormais voir pourquoi la conductivité peut être utilisée comme moyen de détection des mammites chez la vache.

2. La conductivité électrique du lait comme moyen de détection des mammites chez la vache

2.1. Définition de la conductivité électrique

La conductivité électrique est la propriété d'un corps ou d'une substance à transmettre le courant électrique. Elle se mesure en millisiemens par centimètre (mS/cm).

Cette propriété est majoritairement due aux ions (essentiellement chlorures, phosphates, citrates, carbonates et bicarbonates de potassium, sodium, calcium et magnésium) [42].

Une relation linéaire entre la conductivité électrique (en mS/cm) et la concentration en ion chlorure (mg /100 mL de lait) a été mise en évidence.

L'équation est la suivante : $\text{Conductivité} = 0,685 + 0,1039 (\text{Cl}^{-1})$ [60].

Ainsi, tout changement de concentration en ions dans le lait se reflètera par une modification de la conductivité du lait.

2.2. Conductivité électrique et composition du lait

Le lait est composé d'environ 86 à 88% d'eau, 4,9 à 5,1% de lactose, 3,4 à 5,1 % de lipides et 3,3 à 3,9 % de protéines [42].

Il est constitué de deux phases : une phase conductrice (constituée de complexes électrolytiques) et une phase non conductrice (constituée de globules gras et de protéines) [42].

Les cellules sécrétrices de la glande mammaire ont des systèmes de transport actif au niveau de la membrane basolatérale : le sodium est pompé vers le liquide extracellulaire et le potassium est pompé vers l'intérieur de la cellule entraînant un rapport Na^+/K^+ d'environ 3/1 dans le fluide extracellulaire ou le sang alors qu'il est de 1/3 dans le fluide intracellulaire ou le lait (Figure 1).

Dans les conditions normales, au pôle apical des cellules, le sodium et le potassium diffusent passivement par voie trans-cellulaire de la cellule vers le lait.

Pour ce qui est des ions chlorures, leur concentration est supérieure dans le sang et le liquide extracellulaire que dans le lait.

Le lait est iso-osmotique par rapport au sang (pression osmotique équivalente). Il y a ainsi une relation inversement proportionnelle entre la concentration en ions univalents et le lactose permettant le maintien de la pression osmotique. Une grande concentration de lactose est liée à une faible concentration en ions chlorures notamment et vice versa.

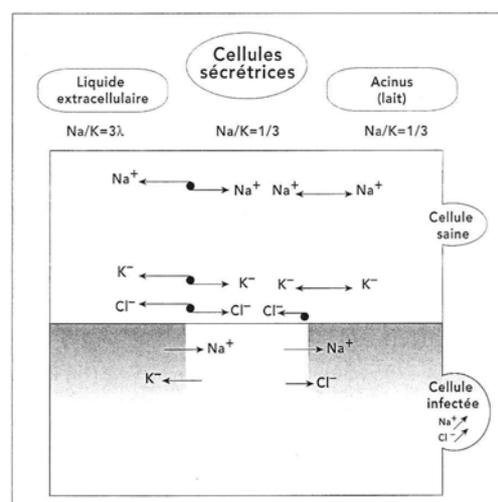


Figure 1 : Echanges ioniques entre la cellule sécrétrice du lait et l'extérieur [6]

Donc d'après ces mécanismes, le liquide extracellulaire est riche en ions sodium et chlorure, mais pauvre en ions potassium et en lactose alors que c'est l'inverse pour le lait.

La phase non conductrice peut influencer indirectement la conductivité.

Les protéines et le lactose ont peu d'influence sur la conductivité [29]. En revanche, le taux de matière grasse peut interférer avec la conductivité puisqu'elle diminue quand le pourcentage de graisse augmente [41, 42]. Ce phénomène est dû au fait que plus de 97% des lipides du lait sont sous la forme de gros globules couverts d'une membrane non conductrice. Il y a donc moins de volume et de mobilité pour les ions [41, 42].

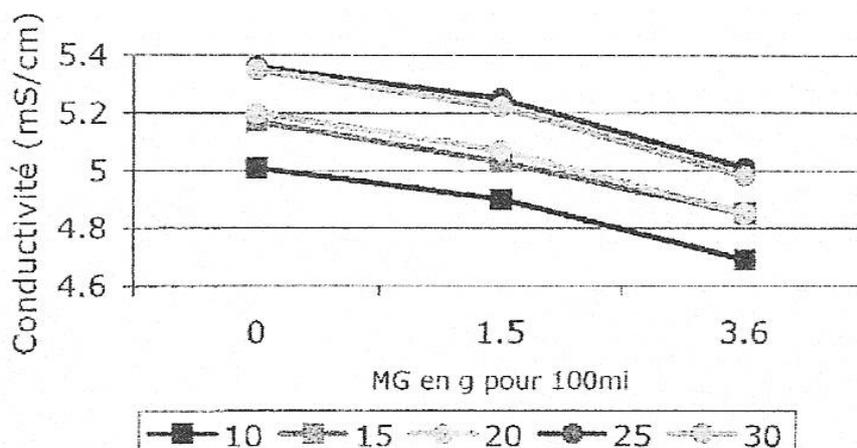


Figure 2 : Influence du taux de matière grasse à différentes températures sur la conductivité électrique du lait [5]

En résumé : la conductivité du lait est déterminée essentiellement par :

- la concentration en porteurs de charges
- l'influence interactive des ions
- le type d'électrolytes
- les composants contribuant à la viscosité du lait (protéines, matières grasses, etc...)

2.3. Conductivité électrique du lait de vache saine

La conductivité du lait d'un quartier sain est en général comprise entre 4 et 5.5 mS/cm à 25°C [6]. Norberg *et al.* (2004) trouvent des valeurs de conductivité du lait issu de quartiers sains comprises entre 5.5 à 6.5 mS/cm à 38°C [53].

Nous verrons par la suite qu'il est difficile d'établir une valeur de conductivité « normale » étant donné les nombreux facteurs de variation existants.

2.4. Conductivité électrique du lait, héritabilité et corrélation génétique

Avant d'utiliser un indicateur en élevage, il faut s'assurer qu'il soit clairement défini, qu'il possède une variabilité interindividuelle suffisante et finalement qu'il soit lié à l'aspect qui nous intéresse (ici les mammites).

2.4.1. Héritabilité

Peu d'études rapportent les paramètres génétiques de la conductivité électrique du lait. D'après Goodling *et al.* (2000 et 2001) [27, 28], pour les vaches en première lactation on a une héritabilité de 0.27 à 0.39 et pour les vaches en seconde lactation de 0.21 à 0.23. Ceci a été obtenu sur 3 500 vaches saillies par 259 taureaux. Les vaches ont été gardées dans 8 troupeaux avec un enregistrement quotidien de la conductivité.

Norberg *et al.* (2004) trouvent les mêmes résultats pour les vaches en première lactation (héritabilité de 0.26 à 0.36) [54, 55].

On remarque que l'héritabilité varie également au cours de la lactation puisqu'il a été montré que l'héritabilité de la conductivité était plus élevée en début de lactation (A 6 jours : $h = 0.32$ à 0.37 et à 30 jours : $h = 0.30$) [54].

En revanche, rappelons que l'héritabilité des mammites cliniques est très faible puisqu'elle est seulement de 0.03 [57].

Ainsi, la part de la génétique sur la variabilité de la conductivité électrique du lait paraît, au vu de ces premiers travaux, assez élevée. Elle est plus ou moins importante en fonction du stade et du rang de lactation, ce qui peut être à l'origine de légères variations en fonction des individus.

2.4.2. Corrélation génétique de la conductivité et des mammites

La corrélation génétique entre la conductivité électrique et les mammites cliniques est positive et a été estimée entre 0.60 (pour les primipares) [55] et 0.80 (pour les vaches en seconde lactation) [28, 54]. D'autres études rapportent des résultats similaires avec, par exemple, une corrélation génétique moyenne de 0.75 entre la conductivité et les mammites [56].

Les résultats diffèrent parfois légèrement entre les études, ce qui peut s'expliquer par les différentes définitions, les effectifs et les modèles statistiques utilisés.

2.4.3. Corrélation génétique de la conductivité et des comptages cellulaires du lait

Comme nous l'avons dit précédemment, les CCS représentent une méthode reconnue dans la détection précoce des mammites.

En plus d'être corrélée positivement aux mammites, la conductivité électrique du lait est corrélée positivement aux CCS. De nombreuses études le mettent en évidence sans toutefois présenter exactement les mêmes résultats. Cela varie de 0.27 à 0.82 [9, 17, 20, 21, 25, 37, 48, 51, 58, 61].

Tous ces résultats permettraient d'aller plus loin qu'une simple utilisation de la conductivité du lait pour détecter les mammites, en laissant envisager l'utilisation de la conductivité comme un moyen d'aide à la sélection génétique d'animaux résistants aux mammites.

Les seuls critères utilisés pour cette sélection génétique sont cependant les CCS et les mammites cliniques.

2.5. Autres facteurs que les mammites influençant la conductivité du lait

La conductivité d'un lait sain présente une grande variabilité. Elle varie en particulier en fonction de l'état de santé et de l'état physiologique de l'animal. Il faut considérer le rang de lactation, la race, l'intervalle entre traites, le stade physiologique, la composition du lait, la température...

D'après Jones *et al.* (1994) [34], les valeurs de conductivité enregistrées toutes les deux secondes au cours d'une traite sont extrêmement variables. Selon les auteurs, il y a des valeurs faibles erronées à cause de la nature du système de mesure électronique.

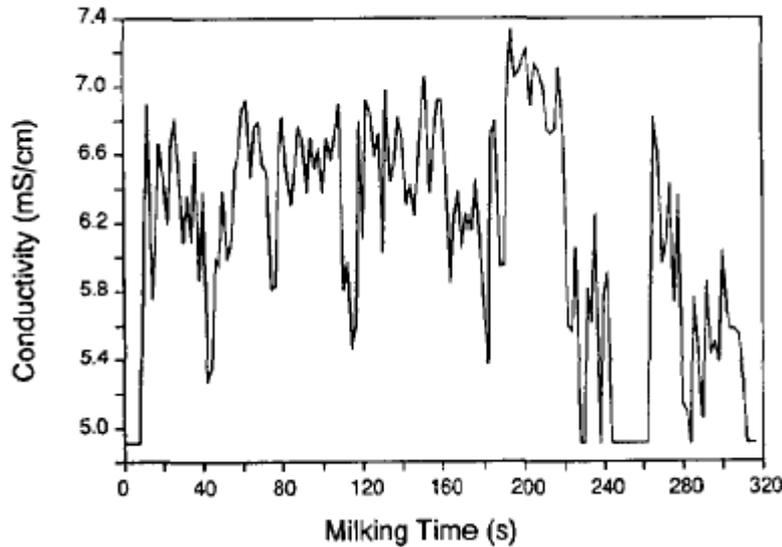


Figure 3 : Conductivité en fonction du temps au cours d'une traite chez une vache saine avec une mesure toutes les deux secondes [34]

Les sources possibles de ces fluctuations sont les turbulences dans le lait et parfois un volume insuffisant de lait pour couvrir la totalité de la surface de l'électrode. Un faible contact entre le lait et les électrodes entraîne un voltage important au niveau de l'électrode et une valeur de conductivité inférieure par rapport à la réalité. La véritable valeur de la conductivité est obtenue quand le contact est complet entre le lait et les électrodes.

Les résultats erratiques causés par les fluctuations de contact lait-électrodes sont de courte durée et peuvent être corrigés en augmentant l'intervalle des mesures enregistrées. Ceci permet de corriger les variations de conductivité au cours de la traite. En revanche, lorsqu'on s'intéresse aux valeurs les plus hautes, une grande variabilité apparaît également.

Ainsi a-t'on remarqué qu'en fonction des études, la distribution des valeurs de la conductivité d'un lait sain pouvait chevaucher celle d'un lait infecté. Par exemple, dans l'étude de Norberg *et al.* (2004) [53], les valeurs de conductivité d'un lait normal varient entre 5.5 et 6.5 mS/cm et celles d'un lait issu d'une mamelle infectée de 5 à 9 mS/cm. Dans une autre étude [47], la valeur absolue de la conductivité la plus élevée parmi les vaches infectées va de 1 à 9 (score variant de 0 à 9 et donné par le conductimètre) et pour les vaches saines de 0 à 9.

Dans l'étude de Mansell *et al.* (2003) [43], les intervalles de valeurs de conductivité donnent pour les quartiers sains une distribution des valeurs allant de 4.2 à 7.2 mS/cm, pour les quartiers infectés par des pathogènes majeurs de 4.5 à 8.4 mS/cm et pour les quartiers infectés par des pathogènes mineurs de 4.5 à 7.7 mS/cm.

Ainsi, bien que la conductivité soit en général, comme nous le verrons par la suite, plus élevée pour les quartiers infectés, le degré de chevauchement des valeurs des deux populations (saine et infecté) n'est pas négligeable même lorsqu'on compare les quartiers d'un même animal entre eux [43, 69]. De plus, il a été montré que le lait normal d'un quartier d'une mamelle saine avait une conductivité inférieure à celle d'un lait normal issu d'un quartier sain mais d'une vache présentant une mammite sur un autre quartier [31].

Tous ces résultats illustrent bien la difficulté d'établir une véritable valeur « normale » de la conductivité électrique d'un lait sain.

On peut ensuite avoir des variations de conductivité en fonction des élevages. Dans l'étude de Chamings *et al.* (1984) [9], la conductivité moyenne des quartiers sains de l'élevage A est égale à la moyenne des quartiers infectés de l'élevage B et est supérieure à la moyenne des quartiers infectés de l'élevage C. La même remarque est soulevée dans d'autres études [71, 73].

Tout ceci résulte d'un ensemble de facteurs propres à l'environnement des animaux, aux animaux eux-mêmes et aux modalités d'évaluation de la conductivité.

2.5.1. Température

Billon *et al.* (2003) [5] montrent qu'il y a une nette augmentation de la conductivité électrique lorsque l'on passe d'une température du lait de 10°C à 30°C.

Entre 15°C et 45°C, on observe une augmentation pratiquement linéaire de 0.113 mS/cm par degré Celsius [6].

Une autre étude démontre une modification d'environ 5% par degré Celsius de la conductance (la conductivité électrique correspond à la conductance d'une portion de matériau de 1 m de longueur et de 1 m² de section ; elle s'exprime en Siemens [18]) [41, 42].

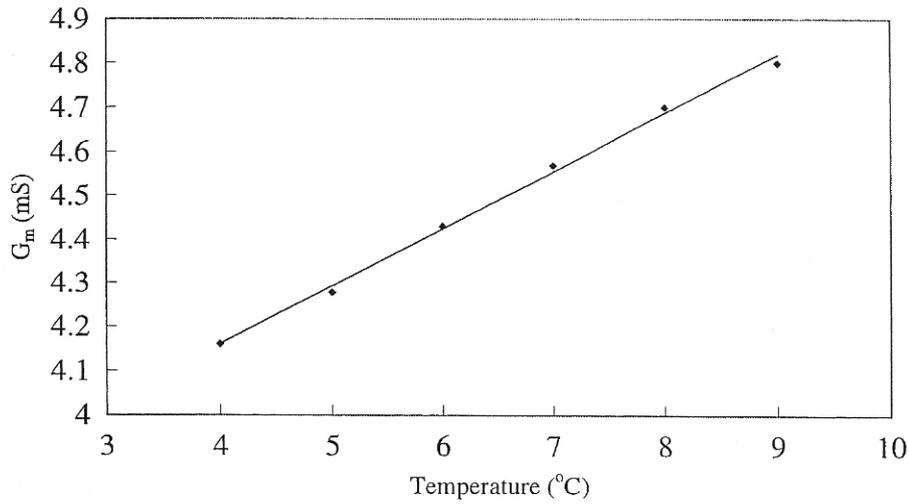


Figure 4 : Influence de la température sur la conductance [41]

2.5.2. Numéro de lactation

Il semblerait, selon certains auteurs, que la parité n'ait aucune influence significative sur la conductivité à condition que les quartiers soient exempts d'infection [72], alors que d'autres démontrent le contraire de manière significative [2]. Cette différence peut s'expliquer par le fait que dans l'étude de Batra *et al.* (1984) [2], les auteurs ne distinguent pas l'influence de la parité en fonction du caractère infecté ou non.

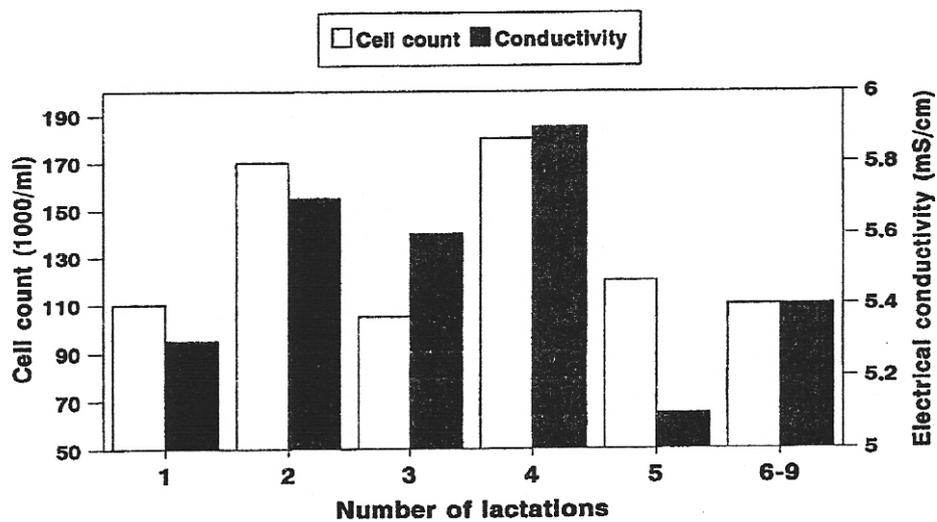


Figure 5 : Variation des CCS et de la conductivité en fonction de la parité [72]

2.5.3. Stade de lactation

Si on évalue la conductivité d'un lait issu d'une vache saine au cours d'une lactation entière on remarque que la courbe obtenue ressemble fortement à la courbe type obtenue pour les CCS [72]. Elle est inverse à la courbe de production laitière.

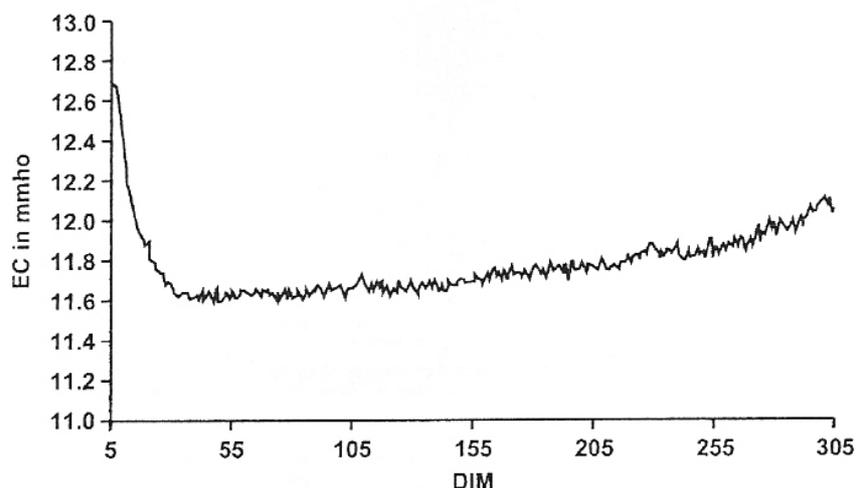


Figure 6 : Conductivité électrique du lait issu d'une vache saine au cours d'une lactation [54]

La conductivité baisse fortement au cours des premières semaines après le vêlage, puis elle remonte plus progressivement tout au long du reste de la lactation.

D'autres études ont démontré que le stade de lactation influençait de manière significative la conductivité électrique du lait issu de quartier sain [72]. Sheldrake *et al.* (1983) montrent que la conductivité du lait d'un quartier sain passe de 5.3 mS/cm à 35 jours post partum à 5.9 mS/cm à la fin de la lactation [72].

Cette variation de la conductivité électrique peut s'expliquer par le changement de composition du lait survenant au cours de la lactation. On a des modifications de concentrations ioniques et des modifications de teneur en matière grasse et en protéines.

En effet, on observe en début de lactation que les ions Ca^{2+} , Mg^{2+} , citrate, Na^+ et Cl^- ont une concentration plus élevée, alors que celle du lactose du lait est plus basse si on les compare au milieu de lactation.

En fin de lactation, la concentration des ions Na^+ et Cl^- du lait est plus élevée, alors que celle des ions K^+ est plus basse si on les compare au milieu de lactation [29].

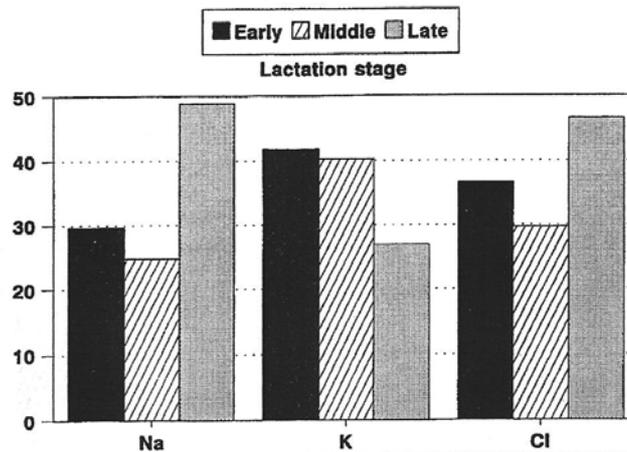


Figure 7 : Variations de concentration (en mMol) dans le lait des ions Na^+ , K^+ et Cl^- en fonction du stade de lactation [29]

2.5.4. Fraction du lait

Des différences de conductivité ont également été mises en évidence en fonction de la fraction du lait utilisée pour réaliser la mesure. En revanche, les conclusions des différentes études ne s'accordent pas. Certains auteurs démontrent qu'il y a une réduction statistiquement significative ($p < 0.01$) de la conductivité entre les premiers jets de traite et le lait de fin de traite chez les vaches saines [31, 83], ce qui est en accord avec les constatations de Nielen *et al.* (1995) [50] et Fernando *et al.* (1985), toujours dans le cas de quartiers sains [21].

Dans le cas de quartiers atteints de mammites subcliniques, il semblerait également que la conductivité du lait des premiers jets soit plus importante que celle du lait de milieu ou de fin de traite [83].

Cependant Gebre-Egzlabher *et al.* (1979) montrent que la conductivité augmente au cours de la traite [25], tout comme Fernando *et al.* (1982), mais uniquement dans le cas de quartiers infectés [20].

Si on considère que les variations de conductivité du lait au cours de la traite résultent des variations de composition du lait, et notamment que la conductivité diminue lorsque le taux de matière grasse augmente [41, 42, 83], il semblerait alors plus cohérent que la conductivité électrique du lait diminue au cours de la traite en raison du taux de matière grasse plus important en fin de traite plutôt qu'en début.

2.5.5. « Race »

Il a été montré que la « race » avait une influence sur la composition ionique du lait et donc indirectement sur la conductivité [29]. En fait, derrière ce mot « race » peuvent se cacher divers facteurs de variation associés et entraînant une confusion possible (systèmes d'élevage, niveau sanitaire et mesures de lutte,...).

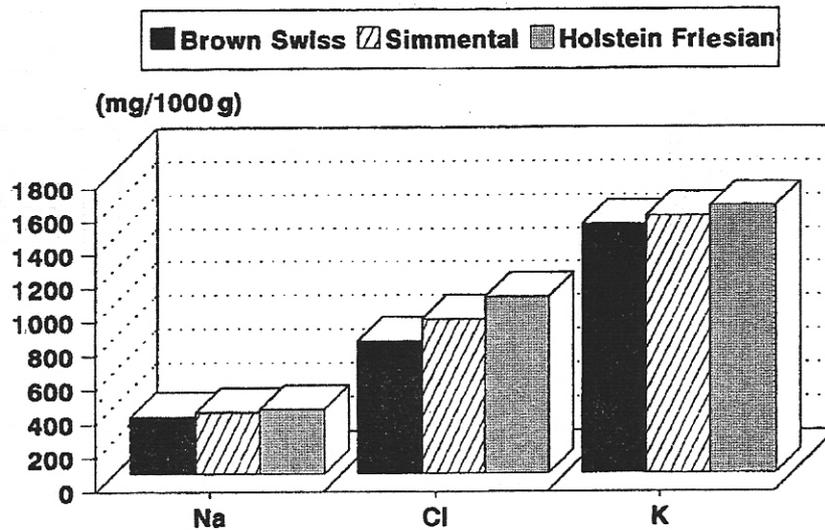


Figure 8 : Concentrations en Na⁺, Cl⁻ et K⁺ dans le lait en fonction des races [29]

D'autres études ont mis en évidence cette variation en fonction des « races ». Outre la composition ionique qui peut varier, de nombreux autres éléments peuvent également jouer un rôle, dont la composition biochimique du lait.

Tableau 4 : Comparaison de la conductivité électrique et des CCS dans le lait de quartiers sains [29]

Race	Pays	Quartiers (n=)	CCS (1000/mL)	Conductivité électrique (mS/cm)
Prim'Holstein	Australie	600	116	5.6
Croisée	Australie	13	140	4.5
DSB	Allemagne	133	32	5.2
Prim'Holstein	Royaume-Uni	12	46	5.2

2.5.6. Alimentation

La ration alimentaire peut, elle aussi, avoir une influence indirecte sur la conductivité électrique du lait. Non pas par effet sur la concentration en ions, mais plutôt par son effet sur la teneur en protéines et surtout en lipides du lait [5]. Mais, de manière générale, cette influence est beaucoup moins importante que l'influence du stade de lactation par exemple.

2.5.7. Intervalle entre traites

L'intervalle entre deux traites peut varier en fonction des systèmes d'élevages et du temps de travail des éleveurs (une traite par jour à plus de deux dans les élevages équipés de robots de traite automatiques).

Le temps séparant deux traites consécutives peut avoir une influence significative sur la conductivité tout comme sur les CCS.

La conductivité du lait après un court intervalle de traite est significativement plus faible qu'après une longue durée (toute une nuit par exemple) [31].

Ceci semble se vérifier à partir d'une certaine limite car il apparaît que des intervalles très courts engendrent des valeurs de conductivité importantes comme c'est le cas avec un intervalle de trois heures par exemple.

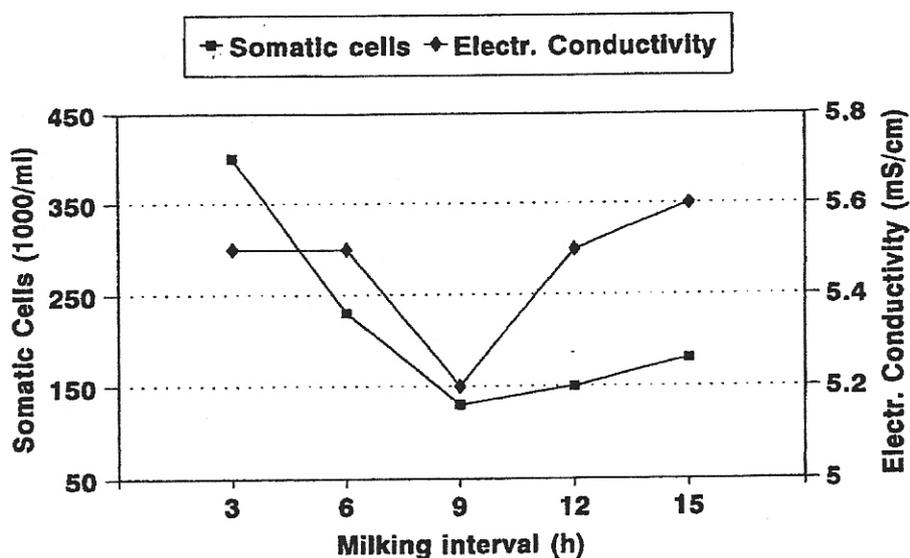


Figure 9 : Influence de la durée de l'intervalle entre deux traites sur la conductivité électrique et les CCS dans le cas de lait sain [29]

2.5.8. Stade physiologique et maladies générales

La conductivité varie aussi en fonction du stade physiologique, tout particulièrement pendant l'œstrus (effet sur la pompe à sodium), ainsi que lors d'atteintes pathologiques générales de l'animal [29].

2.5.9. Bilan

Tableau 5 : Evaluation des paramètres physiologiques sur la conductivité électrique du lait dans les premiers jets de quartiers sains [29]

Paramètre	Influence	Evaluation	Interférence avec la détermination du statut de santé de la mamelle
Stade de lactation	> 10%	Important	Oui
Numéro de lactation	Non significative	Négligeable	Non
« Race »	> 10%	Important	Oui
Alimentation	< 10%	Modéré	Discutable
Intervalle de traite	> 10%	Important	Oui
Statut général de l'animal	> 10%	Important	Oui

Ainsi, de nombreux facteurs ont été mis en évidence comme ayant une influence sur la conductivité du lait de quartier sain. On peut trouver des valeurs de conductivité ne correspondant pas à la valeur normale citée précédemment sans pour autant qu'elles soient dues à une infection intra-mammaire. Il faut donc toujours garder en mémoire ces différents facteurs et connaître leur influence afin de les prendre en compte pour interpréter correctement les valeurs de conductivité obtenues sur un animal. De manière générale, l'ensemble des éléments touchera de manière identique les quatre quartiers d'une vache. Plusieurs des effets seront des effets de troupeau communs à toutes les vaches et à tous les quartiers, et il n'y aura donc aucune variation apparente dans l'évaluation de troupeau autre que de la maladie.

Ceci signifie qu'un seuil global à caractère « universel » pour indiquer l'infection n'est pas possible, mais dans le troupeau et a fortiori pour une vache cela reste envisageable.

De plus, en effectuant une comparaison de la conductivité électrique entre les quartiers d'une même vache, on peut s'affranchir des variations de ces facteurs.

2.6. Mammmites et conductivité du lait

2.6.1. Mécanismes

Les concentrations en lactose et en ions K^+ dans le lait diminuent quand il y a une mammite alors que les concentrations en ions Na^+ et Cl^- augmentent [29] selon les mécanismes illustrés dans la Figure 1 [6].

Ces variations de concentrations en ions dans le lait de mammite sont principalement dues aux dommages cellulaires en particulier au niveau des jonctions serrées des cellules épithéliales, à l'augmentation de la perméabilité des vaisseaux sanguins et à l'altération du système de pompage ionique. Les transporteurs d'ions peuvent ne plus être fonctionnels à cause des toxines bactériennes présentes dans le milieu. Le résultat est que les ions Na^+ et Cl^- diffusent dans le lait selon un gradient de concentration et les ions K^+ et le lactose diminuent en concentration de manière similaire (Figure 1), à l'origine d'une augmentation de la conductivité électrique du lait.

2.6.2. Rapidité de la réponse

Lorsqu'une mammite se déclenche, il faut, pour que l'on puisse détecter une modification de la conductivité, un délai correspondant à l'apparition des dommages cellulaires et de la réponse inflammatoire. Ainsi, on remarque un décalage entre le début de l'infection et l'augmentation de la conductivité tout comme il y a un délai entre le début d'une infection et l'augmentation des CCS.

Une étude a montré que la conductivité du lait de quartiers infectés expérimentalement commençait à augmenter lors de la première traite après l'infusion, mais avant l'augmentation des CCS. [31].

D'après Milner *et al.* (1996) [45], la détection des mammites dues à *Staphylococcus aureus* dans les conditions expérimentales est plus précoce dans 90% des cas que par l'observation des grumeaux.

Ainsi, il semblerait que le délai de modification soit plus court pour la conductivité que les CCS, ce qui ferait de celle-ci un moyen de détection des mammites plus précoce que les CCS ou que l'observation des signes cliniques.

2.6.3. Type d'infection

Lorsqu'on parle de mammite chez la vache, il peut s'agir de plusieurs types d'infections. On distingue deux catégories d'infections : mammite aiguë ou mammite chronique.

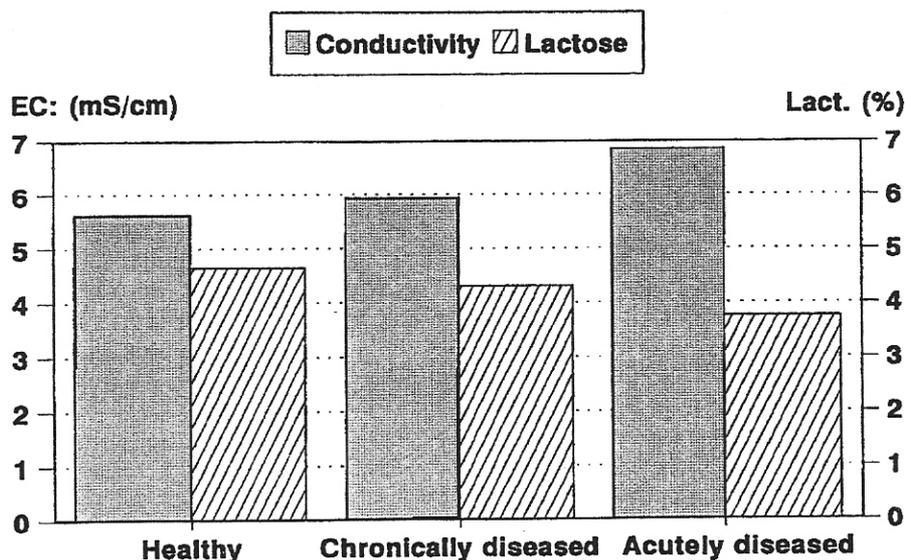


Figure 10 : Conductivité électrique et teneur en lactose du lait issu de trois types de quartiers : sain, mammite chronique, mammite aiguë [29]

Une autre distinction peut également être faite en considérant d'une part les mammites cliniques, c'est-à-dire présentant des signes cliniques visibles par l'éleveur et d'autre part les mammites subcliniques. La difficulté dans la détection des mammites subcliniques par la conductivité est principalement due dans certains cas à une réaction modérée du tissu mammaire, caractérisée par un comptage cellulaire faible (200 à 300 000 cellules/mL), ainsi que des modifications de concentrations ioniques modérées.

Norberg *et al.* (2004) [53] à travers leur étude indiquent une conductivité pour le lait sain de 5.3 mS/cm (± 0.03), pour le lait issu de mammites subcliniques de 5.75 mS/cm (± 0.04) et pour le lait issu de mammites cliniques de 6.73 mS/cm (± 0.06) (significatif avec $p < 0.001$).

Mais, encore une fois, de grandes disparités apparaissent en fonction des études. Pour exemple, en ce qui concerne la conductivité du lait de quartier atteint de mammite subclinique, on peut trouver des valeurs allant de 4.83 à 7.03 mS/cm [33, 83].

Dans tous ces cas de mammites, les modifications de la conductivité ne sont pas les mêmes.

2.6.4. Type de pathogène

La physiopathologie mammaire est influencée par la présence de microorganismes, mais aussi et surtout par leur nombre et leur pathogénicité. La susceptibilité des troupeaux laitiers aux agents infectieux dépend de facteurs génétiques, mais aussi de facteurs liés à la lactation (âge, stade de lactation, niveau de production...), de la conformation anatomique de la glande mammaire, mais aussi du statut immunologique et cytologique initial.

Les mammites peuvent survenir plus aisément et plus sévèrement lorsqu'il y a des facteurs de stress externes (logement inadapté, alimentation insuffisante et/ou carencée...).

Finalement, c'est la pathogénicité de la bactérie et l'efficacité des mécanismes de défenses de l'animal contre les processus infectieux qui seront déterminants dans la gravité et la durée du cas de mammité.

Une classification clinique simplifiée des agents pathogènes responsables de mammites est souvent employée en utilisant les termes de « pathogènes majeurs » (*Staphylococcus aureus*, *Streptococcus uberis*, *Escherichia coli*, *Klebsiella spp*), ou agents d'infections mammaires graves en général, et de « pathogènes mineurs » (Staphylocoques coagulase négatifs, *Corynebacterium bovis*) qui sont à l'origine de mammites discrètes ou subcliniques.

Plusieurs études ont évalué la conductivité en fonction de l'agent bactérien en cause. Il apparaît que l'augmentation de la conductivité électrique du lait varie en fonction de la catégorie de l'agent pathogène.

Tableau 6 : Résumé de plusieurs études sur l'influence du type de pathogène responsable de la mammité sur la conductivité électrique du lait [29]

Nombre de quartiers	Pathogène	Conductivité moyenne (mS/cm)	Référence
292	Aucun	4.91 ± 0.50	[20]
23	Mineur	5.60 ± 1.02	
52	Majeur	6.25 ± 1.02	
220	Aucun	5.21 ± 0.38	[21]
46	Mineur	5.33 ± 0.66	
34	Majeur	5.62 ± 0.49	
600	Aucun	5.6	[72]
1719	Mineur	6.0	
122	<i>Staph. aureus</i>	6.7	
133	Aucun	5.21 ± 0.85	Hamann (1986)
313	Mineur	5.74 ± 1.10	
74	<i>Staph. aureus</i>	6.06 ± 1.08	
120 (vaches saines)	Aucun	5.57 ± 0.03	[31]
20	<i>Str.uberis</i>	5.62 ± 0.08	
20	<i>Staph. aureus</i>	7.53 ± 0.26	

En ce qui concerne ces 5 références, les auteurs se sont globalement basés sur des valeurs moyennes issues d'échantillons de premiers jets de lait.

Les effets des différents pathogènes ont été étudiés récemment [44]. Il a été montré que dans le cas d'infections dues à *Staphylococcus aureus* et *Streptococcus agalactiae*, la conductivité est plus faible que dans les cas dus aux Streptocoques de l'environnement (*Streptococcus uberis* par exemple).

Le lait issu de mamelles infectées par *Streptococcus agalactiae* semble avoir un niveau de conductivité moyen plus élevé que celui de lait infecté par *Staphylococcus aureus* ($p < 0.001$) [9].

Pour les quartiers infectés par *Staphylococcus aureus*, il y aurait une augmentation de la conductivité moyenne à 5.8 mS/cm en première lactation et à 7.5mS/cm pour les autres lactations [52].

Les infections causées par *Escherichia coli* peuvent être caractérisées par une rapide et sévère augmentation de la conductivité, mais celle-ci est de courte durée, comme pour les comptages cellulaires somatiques [19]. Cependant, aucune étude n'a été menée dans le but de décrire et d'expliquer les effets d'*Escherichia coli* sur la conductivité électrique du lait.

Ainsi, on observe d'importantes variations dans l'augmentation de la conductivité électrique d'un lait issu d'un quartier infecté en fonction de l'agent pathogène responsable.

2.6.5. Prévalence des mammites

La prévalence des mammites correspond au nombre total de cas parmi les animaux à risque sur une période donnée (en général un an).

En fonction des élevages, la prévalence des mammites peut varier énormément. Cette variabilité influence l'efficacité de l'utilisation de la conductivité du lait dans la détection des mammites au sein de l'élevage. En effet, pour n'importe quel test, la prévalence influe sur les valeurs prédictives positives et négatives (VPP et VPN) du test, c'est-à-dire le degré de confiance que l'on peut accorder aux résultats obtenus par celui-ci.

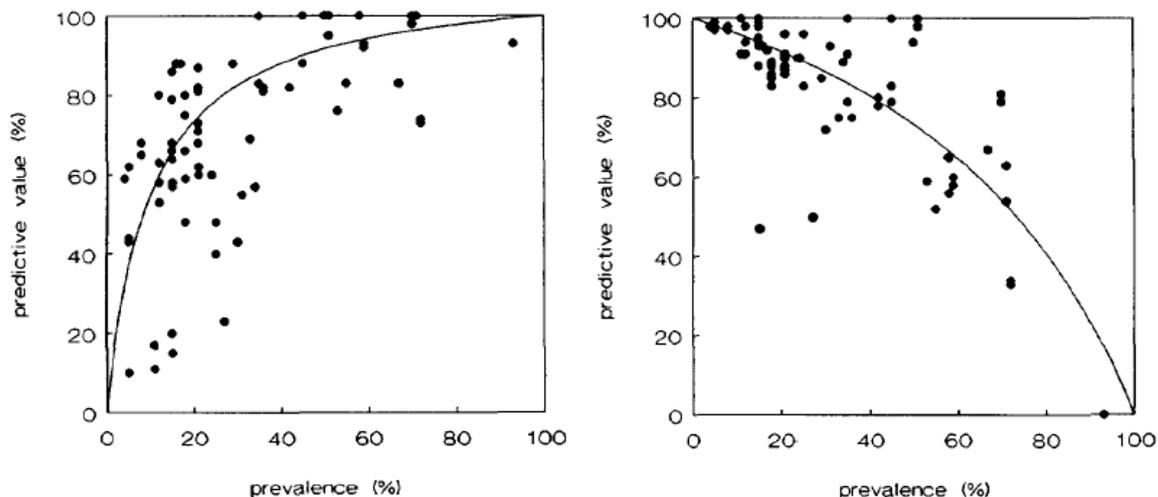


Figure 11 : Variations de la valeur prédictive positive (à gauche) et de la valeur prédictive négative (à droite) en fonction de la prévalence des mammites subcliniques [48]

Ainsi, quel que soit le test, si la prévalence des mammites est importante on aura une forte VPP, c'est-à-dire que la probabilité que l'échantillon testé soit vraiment positif (infecté) lorsque l'appareil le prédit est importante. En revanche la VPN sera faible, c'est-à-dire que la probabilité que l'échantillon soit vraiment négatif (sain) lorsque l'appareil le prédit est faible. Lorsque la prévalence est faible, on a la situation inverse et ceci indépendamment des capacités réelles de détection de l'appareil.

C'est pourquoi il est important de prendre en compte et de connaître la sensibilité et la spécificité des tests, qui sont indépendantes de la prévalence de l'affection dans le troupeau.

2.7. La conductivité « en ligne »

2.7.1. Contexte et besoins des éleveurs

L'actuelle Directive Européenne sur l'hygiène 89/362/CEE [15] préconise ceci : « avant la traite, le lait doit être inspecté » (observation des premiers jets de lait par exemple). Si aucune anomalie physique n'est détectée, le lait peut alors être commercialisé. Ceci est réalisable dans les systèmes de traite traditionnels et lorsque le nombre d'animaux n'est pas trop important, mais l'évolution actuelle des systèmes d'élevages tend à augmenter la taille des troupeaux et à s'orienter vers des systèmes de traite automatiques (robots de traite). Ceci rend alors l'observation individuelle des premiers jets de tous les animaux impossible.

Ainsi, de nouveaux systèmes ont été développés afin de remplacer cette mesure contraignante, permettant une détection avec une capacité de discrimination suffisante et applicable à des mesures en ligne indispensables pour les systèmes de traite automatiques. L'un des seuls éléments pouvant remplir ces objectifs est la mesure de la conductivité électrique du lait.

2.7.2. Principe des conductimètres en ligne

L'avantage des systèmes en ligne est qu'on a une collecte d'informations après chaque traite permettant une analyse immédiate et un stockage des informations issues des traites précédentes. L'appareil est connecté à un programme informatique muni d'un algorithme de calcul plus ou moins puissant capable d'informer l'utilisateur en temps réel sur la détection d'anomalies. L'algorithme permet de calculer et d'interpréter constamment la moyenne de la conductivité électrique et de la comparer soit à un seuil (le plus souvent un pourcentage d'augmentation pour le lait de la mamelle entière), soit à la conductivité la plus basse de l'un des 4 quartiers, soit les deux. Cela a permis une amélioration de la sensibilité et de la spécificité des mesures de conductivité [40].

Le fait de pouvoir stocker les informations permet d'avoir un suivi de la conductivité dans le temps pour chaque animal et parfois pour chaque quartier, ce qui permet d'augmenter l'efficacité du diagnostic [49].

La détection automatique des mammites par ce genre d'appareil est basée sur des mesures de conductivité mais, de plus en plus souvent, elles sont combinées à d'autres paramètres tels que la mesure de la production laitière, de la température du lait, les comptages cellulaires, la couleur du lait... [11, 12]. Couramment, les capteurs commercialisés donnent des « alertes » lorsqu'un critère ou une combinaison de critères varient ou dépassent une valeur seuil. L'éleveur combine alors cette alerte avec ses propres observations et décide ensuite de la marche à suivre.

Ces systèmes, qui font partie intégrante de la machine à traire, mesurent soit la conductivité du lait de mélange de la vache, soit celle de chaque quartier, ce dernier présentant l'avantage d'éviter le phénomène de dilution lorsque, par exemple, un seul des quatre quartiers d'une vache est atteint.

2.7.3. Variabilité des systèmes

Plusieurs modèles de détection ont été proposés [7, 11, 12, 20, 35, 37, 40, 48, 49, 50, 51, 53, 82].

Certains sont basés sur des modèles simples avec un seuil « absolu » : la conductivité des vaches est enregistrée et comparée à un seuil unique [13, 25, 53].

De manière générale avec ces systèmes en ligne, selon les études et les germes mis en cause, la sensibilité varie entre 50 et 80%, alors que la spécificité varie dans le même temps entre 60 et 90% [5].

D'autres systèmes encore plus performants effectuent une détection des mammites en utilisant en plus les informations des traites précédentes (en anglais : « time series models »). Ce sont les déviations entre les données obtenues à un instant t et celles prévues par l'appareil sur la base des données des traites précédentes qui entraînent une alerte mammité.

Ces modèles beaucoup plus complexes d'un point de vue du traitement des données ont montré de bons résultats avec une sensibilité et une spécificité supérieures aux modèles simples vus précédemment [7, 8, 11, 12, 13].

Les systèmes mesurant puis comparant la conductivité des différents quartiers, sembleraient plus efficaces que ceux travaillant sur le lait de mélange des quatre quartiers [20, 25, 48, 53, 73]. Cette comparaison peut être faite soit en utilisant la différence entre les quartiers, soit en calculant le rapport de la conductivité des quatre quartiers. Le fait de comparer les différents quartiers d'une même vache entre eux (différence ou rapport) permet de partir du principe que le quartier qui a la conductivité électrique du lait la plus faible a la probabilité la plus faible d'être infecté et peut donc servir de référence pour les autres quartiers. Un problème peut être soulevé lorsque la prévalence des quartiers atteints est importante et donc que certains animaux peuvent avoir plusieurs quartiers touchés. Cependant, il est rare que les quatre quartiers d'une même vache soient atteints en même temps.

L'intérêt d'utiliser le rapport est donc de s'affranchir des facteurs spécifiques de la vache et des facteurs environnementaux sources de variations de la conductivité mais qui, rappelons-le, touchent de manière équivalente les quatre quartiers de l'animal.

Lorsque les mesures sont faites au niveau du quartier, en toute rigueur une correction de l'interdépendance doit être considérée. En effet, il a été démontré qu'il n'y avait pas

d'indépendance totale entre les quatre quartiers d'une vache. Des méthodes statistiques pour corriger les sous-estimations de variance sont disponibles [1].

Ces systèmes en partie différents de mesure de la conductivité semblent efficaces si le cadre d'utilisation est bien précis. Ils répondent correctement à un certain nombre d'attentes et de besoins des éleveurs. En revanche, le coût relativement important de ce type d'appareil freine leur généralisation au sein des élevages.

2.8. La conductivité avec appareils de mesure portatifs

2.8.1. Besoins des éleveurs

Les systèmes de mesure de la conductivité en ligne vus précédemment ne permettent pas de répondre à la totalité de la demande des éleveurs. Beaucoup recherchent des outils de détection efficaces, simples d'utilisation, peu onéreux, avec un résultat rapide, disponibles au pied de l'animal, voire un outil de remplacement des CCS ou du CMT.

Les conductimètres portables présents sur le marché semblent répondre parfaitement à ces attentes à en croire leurs fabricants et les publicités mises à la disposition des éleveurs.

2.8.2. Etude bibliographique

Une étude a évalué l'utilisation d'un de ces appareils, le MAS-D-Tec® de la société Wescore dans la détection des mammites subcliniques dans les fermes du Costa Rica [47].

A l'issue de cette étude, les auteurs rapportent qu'en aucun cas cette méthode ne semble suffisante pour une détection efficace des mammites subcliniques. En utilisant les recommandations du fabricant, on trouve que 71% des résultats positifs correspondent, d'après les cultures bactériologiques, à des laits négatifs et, inversement, des pathogènes majeurs ont été mis en évidence sur 11% des échantillons diagnostiqués négatifs par l'appareil. En revanche, une autre étude plus récente effectuée sur 236 quartiers montre une sensibilité du MAS-D-TEC® de 100% et une spécificité de 43,3% [26].

D'autres appareils ont été étudiés [9, 31, 33, 43, 45, 47, 58, 69] et les conclusions sont contradictoires, d'autant plus que les études sont difficilement comparables. En effet, de nombreux éléments de variation peuvent entrer en jeu (méthode de référence pour considérer

si le quartier est sain ou pas, utilisation de valeurs de conductivité absolues ou relatives, fractions de lait utilisées différentes, race des animaux différentes...). Il est donc difficile de se faire un avis sur l'efficacité réelle de ces appareils.

3. Bilan des études sur la conductivité électrique comme moyen de détection des mammites dans la littérature

De nombreux auteurs ont donc conclu d'après leurs travaux que la conductivité électrique du lait avait un potentiel pour détecter les mammites chez la vache [2, 4, 7, 8, 9, 11, 12, 13, 17, 20, 21, 25, 26, 29, 31, 33, 35, 39, 40, 43, 45, 47, 49, 50, 51, 52, 53, 58, 59, 72, 73, 82, 83].

Mais les résultats de ces nombreuses études sur le sujet sont parfois contradictoires [5, 6, 7, 22, 29, 37, 53, 61, 65, 69, 71].

L'intégralité des résultats de ces différentes études est disponible en Annexe n°2.

La disparité des résultats de toutes ces études (sensibilité de 2,8 à 100%, spécificité de 0 à 100%, valeur prédictive positive de 10 à 100%, valeur prédictive négative de 52 à 100%) peut être attribuée à de nombreux facteurs incluant les différences de test de référence (bactériologie, CCS, CMT...), de seuil choisi, de nature d'échantillon prélevé (premiers jets ou pas, lait de mélange...) ainsi que des conditions de conservation (lait frais, réfrigéré ou décongelé), de durée de la période de référence choisie avant que l'appareil ne génère une « alarme mammite » par exemple, de systèmes de mesure (portatifs ou en ligne), des appareils eux-mêmes avec leurs caractéristiques techniques (électrode...), de la prévalence des mammites dans le troupeau considéré...

Au vu de l'ensemble de ces éléments qui nous amène à ne pas pouvoir réellement trancher quant à l'efficacité des appareils de conductimétrie, notamment les appareils portables, et quant à leur utilisation potentielle par les éleveurs, nous allons aborder la partie expérimentale qui a consisté à tester différents appareils et à les comparer à deux autres techniques de référence en essayant de se placer au plus près des conditions réelles d'utilisation par les éleveurs.

Deuxième partie : Etude expérimentale

1. Objectif de l'étude

Le but de cette étude était de comparer différents conductimètres mis à la disposition des éleveurs pour détecter les mammites, en particulier subcliniques, chez les vaches laitières par rapport à la méthode de référence : le comptage cellulaire (Samacount® utilisé dans les centres interprofessionnels d'analyse laitière ou CIAL).

Les différentes méthodes comparées ont été : l'appareil portatif de comptage cellulaire DCC® Delaval, le California Mastitis Test (CMT) et 3 appareils portables de mesure de la conductivité du lait (le 4QMAST® de la société Dramiński, le MAS-D-TEC® (MD-19) de la société Wescore, le MMS 3010® de la société IfU GmbH).

2. Matériels et méthodes

2.1. Description et mode d'emploi des appareils et des techniques

Le choix des 3 appareils de conductimétrie s'est effectué par consultation des liens commerciaux disponibles sur Internet et par sollicitation des sociétés produisant ou commercialisant les appareils. Trois d'entre elles ont accepté de prêter un de leurs appareils dans le cadre de l'enseignement de propédeutique et sémiologie de la mamelle.

2.1.1. Le California Mastitis Test (CMT)

2.1.1.1. Description

Il s'agit là d'une méthode semi-quantitative d'évaluation de la concentration en cellules somatiques du lait. On utilise le CMT sur le lait de chaque quartier en le mélangeant à volume égal avec un tensio-actif (le Na-Teepol). Ce dernier agit avec l'A.D.N. contenu dans les cellules en provoquant leur lyse et la formation d'un flocculat plus ou moins marqué. L'importance et la consistance du précipité formé est alors fonction de la teneur en cellules de l'échantillon de lait. Dans notre cas, le réactif utilisé était le Leucocyttest® du laboratoire MERIAL. Il possède en plus un indicateur coloré (le pourpre de bromo-crésol) qui vire au bleu-violet. L'intensité de la coloration est d'après le fabricant fonction de la teneur en cellules de l'échantillon.

Les plateaux utilisés ont été ceux fournis avec les réactifs. Ils sont constitués de quatre coupelles, A, B, C, et D correspondant respectivement aux quartiers avant droit, arrière droit, avant gauche et arrière gauche.

2.1.1.2. Principe d'utilisation

On prélève les premiers jets de lait de chaque quartier dans chacune des coupelles correspondantes du plateau, puis on incline le plateau pour éliminer l'excès de lait et ainsi en garder une quantité d'environ 2 mL. On ajoute ensuite dans chaque coupelle une quantité équivalente de réactif, on mélange en effectuant des mouvements circulaires du plateau. Enfin, on apprécie la présence ou non du flocculat et son intensité.

2.1.1.3. Interprétation des résultats selon le fabricant

Tableau 7 : Interprétation du CMT et correspondance avec les CCS [22, 62, 65]

Description	Score CMT	Cellules/mL	Interprétation
Absence de flocculat, le mélange demeure liquide.	0	0 à 200 000	Sain
Le mélange devient légèrement visqueux, la réaction est réversible et la viscosité tend à disparaître.	Traces	150 à 500 000	Douteux
Le mélange devient visqueux sans formation de gel, la viscosité persiste.	1	400 à 1 500 000	Mammite subclinique
Formation d'un gel adhérent.	2	800 à 5 000 000	Mammite subclinique nette
Gel épais	3	> 5 000 000	Mammite subclinique sévère

Une fois la manipulation terminée, on nettoie le plateau à l'eau claire avant de passer à la vache suivante.

2.1.2. Le MAS-D-TEC® (MD-19)

2.1.2.1. Description

Le MAS-D-TEC® est présenté Figure 12.



Figure 12 : Appareil de conductimétrie MAS-D-TEC® [80]

Il s'agit, d'après le manuel commercial, d'un analyseur électronique portable permettant une détection rapide des mammites subcliniques chez les vaches. Les résultats sont obtenus de manière immédiate et facile ne nécessitant aucune expérience particulière du manipulateur. Cet appareil et les autres conductimètres, s'utilisent sans nécessité de réactifs (révélateurs, additifs...). Il présente deux orifices, un dans sa partie supérieure par lequel on introduit l'échantillon de lait et un autre dans sa partie inférieure permettant l'évacuation du lait. Le lait est alors analysé lors de son passage à travers l'appareil. Le résultat apparaît sous forme d'une diode lumineuse rouge qui s'allume devant une valeur chiffrée.

Caractéristiques techniques :

Dimensions : 7.1 cm de diamètre maximum et 18 cm de haut

Poids : environ 300g

Matériel : polycarbonate

Alimentation : 1 pile alcaline de 9 V, type MN 1604 ou équivalent

Nombre de tests réalisables avec une pile : 30 000 tests

Volume de l'échantillon : au moins 2 mL

Voyant de lecture : diode rouge déplaçable sur une échelle graduée de 0 à 9

Température de travail et de stockage : 5 à 40 °C

Humidité maximale : 80 %

Prix : 268 \$ soit un peu plus de 200 € TTC (prix indiqué le 15 février 2009 d'après le site internet [81]).

2.1.2.2. Principe d'utilisation

On tient l'appareil verticalement, puis on extrait, d'après les recommandations du fabricant, les premiers jets de lait d'un quartier jusqu'à écoulement par l'orifice inférieur de l'appareil. Il faut maintenir le bouton pendant 3 secondes lors du passage du lait à travers l'appareil, on peut alors noter la position de la diode rouge sur l'échelle graduée. On procède de la même manière pour les quartiers suivants. Il faut s'assurer qu'il n'y a pas de bulles d'air lors du passage du lait, car cela pourrait fausser les résultats.

A la fin de chaque séance, l'appareil est rincé avec de l'eau savonneuse.

2.1.2.3. Résultats et interprétation

Le seuil « absolu » fixé par le fabricant est approximativement de 7 000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (à 37 °C) ce qui correspond à la position 5 de la diode de l'appareil.

Tableau 8 : Interprétation des résultats du MAS-D-TEC® (d'après la notice d'utilisation)

Position de la diode	Conductivité ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Interprétation
0 à 4	< 7 000	Quartier sain
5 à 9	>7 000	Quartier infecté (mammite subclinique)

Une fois les valeurs de chaque quartier obtenues, on peut comparer les différents quartiers entre eux ce qui permet d'éliminer les faux négatifs selon le constructeur : si un des quartiers présente un écart de deux unités en plus par rapport aux autres quartiers qui eux, sont apparemment sains (diode entre 0 et 4), on peut considérer le quartier comme infecté même si la diode est inférieure à 5.

Le constructeur indique que l'appareil a été calibré à partir de lait de vache de race Prim'Holstein. Comme la conductivité électrique est variable selon les « races », cet appareil pour être le plus fiable doit être utilisé sur des cheptels de Prim'Holstein ce qui sera le cas lors de notre étude.

Par exemple, le constructeur informe que pour la race Jersey, on lit un résultat inférieur de 2 unités par rapport à du lait de Prim'Holstein, ainsi une lecture de « 3 » sur l'appareil avec du lait de Jersey nous indique qu'il est infecté. Aucun essai n'a été réalisé sur les autres races par le fabricant.

2.1.3. Le 4QMAST®

2.1.3.1. Description

L'appareil de conductimétrie 4QMAST® est présenté Figure 13.



Figure 13 : Appareil de conductimétrie 4QMAST® [77]

Il s'agit d'un appareil électronique portable constitué d'un récipient jaugé, d'un écran de lecture à cristaux liquides et d'une poignée avec un interrupteur marche/arrêt. Le mode d'emploi préconise de faire l'analyse sur les premiers jets de lait. Au fond du récipient se trouvent deux électrodes permettant l'analyse. Cet appareil ne mesure pas directement la conductivité du lait, mais sa résistivité qui est l'inverse de la conductivité. Les mesures se font sur chacun des quartiers, les valeurs chiffrées sont lisibles sur l'écran et sont gardées en mémoire. En plus des mesures absolues, l'appareil calcule l'écart relatif des valeurs des quatre quartiers d'une même vache.

Caractéristiques techniques :

Poids total : environ 300 g

Alimentation : 1 pile de 9 V, type 6 F22

Prise de courant : environ 14 mA

Voyant de lecture : 4 x 3 chiffres, type LCD

Echelle : 10 unités

Mesure minimale : 10

Mesure maximale : 990

Température de travail et de stockage : 0 à 50 °C

Humidité maximale : 95 %

Prix : 250 € TTC (prix indiqué le 04 mai 2009 d'après le site internet [78])

2.1.3.2. Principe d'utilisation

Les électrodes sont dégraissées avant toute séance de mesures à l'aide d'un détergent usuel (ex : liquide vaisselle) afin d'éviter tout encrassement ou dépôt de graisse qui pourrait fausser les mesures. Lors de la mise en marche de l'appareil, quatre zones de mesure apparaissent à l'écran. Une des zones clignote et nous indique quel quartier il faut prélever. Extraire les premiers jets de lait du trayon jusqu'au trait de jauge (quantité minimale environ 1 cm au-dessous du bord supérieur). Attendre environ 1 minute et appuyer de nouveau sur l'interrupteur pour afficher le résultat. On déverse ensuite le lait, on rince le récipient avec de l'eau tiède, on presse l'interrupteur pour que la zone suivante clignote puis on prélève le trayon suivant de la même manière que précédemment et ainsi de suite pour l'ensemble des quartiers.

Une fois les quatre valeurs obtenues, on peut appuyer sur l'interrupteur afin d'obtenir l'écart relatif entre chacun des quartiers.

On peut effacer toutes les mesures pour passer à l'évaluation d'une seconde vache en appuyant brièvement sur l'interrupteur ou l'éteindre en maintenant appuyé l'interrupteur pendant plus de 3 secondes.

2.1.3.3. Résultats et interprétation

Tableau 9 : Interprétation des résultats de l'appareil 4QMAST® (d'après la notice d'utilisation)

Valeurs chiffrées	Interprétation
Inférieure à 250 unités	Quartier infecté (mammite subclinique)
Entre 250 et 300 unités	Etat intermédiaire (prendre en compte d'autres valeurs)
Supérieure à 300 unités	Quartier sain

L'interprétation des résultats se fait aussi en comparant les 4 quartiers entre eux. S'il y a une différence de 40-50 unités entre le résultat chiffré le plus élevé et le plus bas, on considère que le quartier qui a la valeur la plus basse est infecté (et ceci même si la valeur est supérieure à 300 unités).

2.1.4. Le MMS 3010®

2.1.4.1. Description

L'appareil de conductimétrie MMS3010® est présenté Figure 14.



Figure 14 : Appareil de conductimétrie MMS3010® [79]

Cet appareil portable permet la détection des mammites subcliniques au pied de l'animal, de manière simultanée pour les quatre quartiers. La lecture des résultats est très simple et se fait sous forme de diode ce qui ne nécessite aucune compétence particulière.

L'appareil possède un manche au bout duquel se trouve un plateau composé de 4 coupelles contenant chacune 2 électrodes en graphite et une sonde de température. A proximité de chaque coupelle se trouve un voyant qui permettra de visualiser le résultat.

On obtient ainsi une mesure de la conductivité et de la température du lait de chaque quartier, puis l'appareil exprime les résultats en ramenant la conductivité pour une température de 25°C.

Remarque : cet appareil est vendu avec un liquide de testage afin de vérifier régulièrement si l'appareil est toujours bien étalonné.

Caractéristiques techniques :

Poids : 305 g

Dimensions : 320 mm x 120 mm x 36mm

Alimentation : batterie rechargeable - chargeur secteur : 220-240 V AC, 50/60 Hz – 8.4 V/400 mA

Durée de charge : approximativement 4 à 5 heures

Intervalle de mesure : 0 à 15 mS/cm

Visualisation des résultats : diode

Compensation de température : de 10 à 40 °C (+/- 0.2 °C)

Taille de l'échantillon : 5 mL maximum

Température de travail : 0 à 50 °C

2.1.4.2. Principe d'utilisation

L'appareil se met en marche en appuyant une fois sur l'interrupteur. Les voyants sont alors de couleur orange. On remplit chaque coupelle jusqu'au trait indicateur (maximum 5 mL), ce qui correspond à un ou deux jets de lait environ. On effectue le test sur les premiers jets selon les recommandations du fabricant. Le résultat s'affiche dès que le niveau de lait est suffisant dans la coupelle. Si on appuie une seconde fois sur l'interrupteur, l'appareil compare les écarts absolus des quatre quartiers.

A la fin de chaque utilisation, chaque coupelle est rincée à l'eau chaude puis nettoyée à l'aide du produit nettoyant fourni avec l'appareil, puis de nouveau rincée à l'eau claire et chaude.

2.1.4.3. Résultats et interprétation

Tableau 10 : Interprétation des résultats de l'appareil MMS3010® (d'après la notice d'utilisation)

Couleur de la diode	Conductivité (mS/cm)	Interprétation
Verte	< 6.5	Quartier sain
Rouge	>6.5	Quartier infecté (mammite subclinique)

Lorsque l'appareil compare les quatre quartiers, si les quatre diodes clignotent en vert cela signifie que les quatre échantillons mesurés avaient une mesure de conductivité inférieure à 4 mS/cm : ils sont tous considérés comme sains.

Si l'appareil mesure des écarts de 15 % voire plus (correspondant à un écart d'au moins 2 mS/cm), il nous indique par une diode de couleur rouge les quartiers considérés comme infectés.

2.1.5. Tableau récapitulatif comparant les appareils de conductimétrie testés

Tableau 11 : Récapitulatif des caractéristiques des trois conductimètres portables

	4QMAST®	MAS-D-TEC®	MMS 3010®
Poids (g)	300	300	305
Dimensions (cm)	Non fournies	18 x 7.1	32 x 12 x 36
Alimentation	Une pile de 9 V	Une pile 9 V	Batterie rechargeable
Prise en compte de la température	Non	Non	Oui
Nombre de coupelles	1	1	4
Analyse simultanée des 4 quartiers	Non	Non	Oui
Mesure des écarts relatifs entre les 4 quartiers par l'appareil	Non	Non	Oui
Résultats	Chiffrés	Curseur lumineux	Diode lumineuse
Prix (€ TTC)	250	200	Non fourni

2.1.6. Le compteur cellulaire DCC® Delaval

2.1.6.1. Description

Le compteur cellulaire DCC® Delaval est présenté Figure 15.



Figure 15 : Compteur cellulaire DCC® Delaval [76]

Il s'agit d'un appareil portable avec écran LCD rétro-éclairé et muni d'un clavier qui est capable d'effectuer des comptages cellulaires sur des échantillons de lait par la méthode opto-fluoro-électronique. Le principe est identique à celui utilisé par les laboratoires interprofessionnels d'analyse laitière.

Caractéristiques techniques :

Poids : 4.1 kg

Dimensions : 235 x 236 x 249 mm

Alimentation : Batterie non rechargeable (17 000 mAH) – puissance : 12 V DC Nominal

Nombre de tests réalisables avec une batterie : plus de 750 mesures

Plage de mesures : 10 000 à 4 000 000 cellules somatiques/mL (affichage de 10 à 4 000 μ L)

Volume de l'échantillon : 60 μ L

Température de fonctionnement : 10 à 40 °C

Température de stockage : -20 °C à 70 °C

Taux d'humidité : 10 % à 85 %

Prix : 3 100 € hors taxe (d'après la société Delaval contactée par e-mail le 29 avril 2009).

2.1.6.2. Principe d'utilisation

On prélève par aspiration à l'aide d'une petite cassette une quantité de lait prédéfinie. On introduit la cassette dans l'appareil et le comptage s'effectue automatiquement. Au bout de quelques minutes, on peut lire la valeur du comptage cellulaire de l'échantillon. On procède de la même manière pour les autres quartiers en utilisant une nouvelle cassette pour chaque échantillon.

N.B. : les cassettes neuves doivent être stockées au réfrigérateur.

2.1.6.3. Résultats et interprétations

Les résultats obtenus sont des comptages cellulaires.

Tableau 12 : Interprétation des résultats de l'appareil DCC® Delaval (d'après la notice d'utilisation)

Comptages cellulaires (cellules/mL)	Interprétation
< 300 000	Quartier sain
Entre 300 000 et 800 000	Quartier douteux
> 800 000	Quartier infecté (mammite subclinique)

2.2. Le troupeau expérimental

Toutes les mesures ont été réalisées sur des vaches hospitalisées à l'Ecole Nationale Vétérinaire de Toulouse (ENVT) par le service de pathologie du bétail.

Chaque vache a été choisie de manière aléatoire sans tenir compte du motif d'hospitalisation pour lequel elle était présente à l'ENVT. Toutefois ce motif a été répertorié pour chacune des vaches.

Au total 22 vaches ont participé à cette étude, toutes de race Prim' Holstein. Afin d'augmenter le nombre d'échantillons testés nous avons parfois été amenés à utiliser des échantillons des mêmes vaches mais jamais le même jour.

Le stade de lactation des vaches n'a pas été répertorié.

2.3. Le mode opératoire et le nombre de points

Les mesures ont été réalisées au cours de plusieurs séances qui se sont étalées du 10 novembre 2008 au 14 mai 2008. Les prélèvements ont été effectués en fonction des séances avant la traite du matin ou avant celle du soir. Dans quelques cas, les prélèvements ont été faits après la traite.

Au terme de l'ensemble des séances, nous avons obtenu 169 échantillons utilisables sur l'ensemble 22 vaches.

La majorité des séances se sont réalisées dans le cadre de Travaux Pratiques (TP) dispensés aux élèves de deuxième année de second cycle par l'unité de Pathologie de la reproduction (D. Bergonier).

2.4. Protocole de chaque séance

Les étudiants s'attribuent une des vaches parmi celles qui sont présentes le jour du TP.

2.4.1. Examen clinique de la mamelle

Chaque vache subit un examen clinique de la mamelle afin de notifier d'éventuels signes cliniques, physiques ou fonctionnels (abcès, palpation des nœuds lymphatiques rétro-mammaires, inspection et palpation des trayons et des quartiers...). L'ensemble de ces informations est répertorié à l'annexe n° 3.

Les critères d'appréciation permettant de dire qu'il s'agit d'une mammite clinique étant : une induration du quartier et/ou un œdème du quartier et/ou la présence de grumeaux détectés à l'aide d'un bol à fond noir.

2.4.2. Prélèvements de lait

Après avoir nettoyé chacun des quartiers à l'aide d'une solution tiède iodée (Vétédine SavonND) et d'une lingette à usage unique, les étudiants observent les premiers jets dans un bol de traite à fond noir afin de détecter d'éventuelles modifications d'aspect, de consistance (grumeaux...) qui seront notifiés systématiquement sur la fiche de TP (annexe n° 3). Tous les échantillons représentent des laits de quartier. De manière générale le délai entre la dernière traite et la séance était d'environ 16 heures. Quelques exceptions sont toutefois à noter : dans certains cas, les vaches avaient été traitées quelques heures avant la séance de TP.

Les différents prélèvements et tests sont ensuite effectués dans l'ordre suivant :

- 1- Prélèvements destinés au CIAL SO (Centre Interprofessionnel d'Analyse Laitière du Sud-Ouest) pour le comptage cellulaire de référence par la technique opto-fluoro-électronique.
- 2- Prélèvements destinés au compteur cellulaire DCC® Delaval.

3- CMT : Les scores sont notés sur une feuille après validation par l'enseignant (D. Bergonier) ou moi-même afin de s'affranchir d'un biais qui serait dû au caractère subjectif de l'évaluation de l'intensité du flocculat et de la couleur par chaque étudiant.

4- MAS-D-TEC®.

5- 4QMAST®.

6- MMS 3010®.

Les pots destinés au CIAL SO étaient regroupés et conservés au froid (+ 4°C) avant leur acheminement.

Lors de certaines séances, pour cause de réalisation pratique, certains prélèvements destinés au CIAL SO ont été réalisés de manière décalée plusieurs heures après la séance (environ 3 heures). Ces prélèvements ont tout de même été inclus dans les calculs.

Les faibles quantités prélevées pour chacun des tests nous amènent à dire que nous avons utilisé du lait de la citerne (trayon+glande) et jamais de lait alvéolaire.

2.5. Analyse statistique

Pour comparer les différents pourcentages (sensibilité, spécificité, valeurs prédictives et efficacité) obtenus en fonction des appareils utilisés, nous avons utilisé le test de KHI DEUX avec une valeur du risque α de 5% ce qui correspond à la probabilité de se tromper lorsque l'on affirme que deux pourcentages sont statistiquement différents.

2.6. Classements des résultats bruts

Les résultats obtenus ont donc été comparés à ceux obtenus avec la méthode de référence qu'est le comptage cellulaire individuel fait par le CIAL SO. Dans un premier temps, nous avons utilisé un seuil de 300 000 cellules/mL de lait. Ainsi, on considérera par la suite qu'au-delà de cette valeur on a une mammite subclinique, alors qu'en dessous le lait est normal.

Le test est dit positif lorsque celui-ci nous indique que le quartier est atteint d'une mammite subclinique.

Tableau 13 : Seuils retenus pour les différents appareils testés

Appareil	Test négatif	Test positif
CMT	0	Traces ou > 1
DCC® Delaval	< 300 000 cells/mL	> 800 000 cells/mL
MAS-D-TEC®	Diode < 5	Diode \geq 5
4QMAST®	\geq 300 Ω .m	\leq 250 Ω .m
MMS3010®	Diode verte	Diode rouge

Pour chaque appareil nous avons donc déterminé le nombre d'enregistrements pouvant être classés dans les catégories suivantes :

- vrais positifs (VP)
- vrais négatifs (VN)
- faux positifs (FP)
- faux négatifs (FN)

Avec VP : score CMT = 1 ou 2 et/ou DCC® > 800 000 cellules/mL et/ou MAS-D-TEC® \geq 5 et/ou 4QMAST® \leq 250 et/ou diode MMS 3010® = rouge et CCS CIAL > 800 000 cellules/mL.

VN : score CMT = 0 et/ou DCC® < 300 000 cellules/mL et/ou MAS-D-TEC® < 5 et/ou 4QMAST® \geq 300 et/ou diode MMS 3010® = verte et CCS CIAL < 300 000 cellules/mL.

FP : score CMT = 1 ou 2 et/ou DCC® > 800 000 cellules/mL et/ou MAS-D-TEC® \geq 5 et/ou 4QMAST® \leq 250 et/ou diode MMS 3010® = rouge et CCS CIAL < 300 000 cellules/mL.

FN : score CMT = 0 et/ou DCC® < 300 000 cellules/mL et/ou MAS-D-TEC® < 5 et/ou 4QMAST® \geq 300 et/ou diode MMS 3010® = verte et CCS CIAL > 800 000 cellules/mL.

2.7. Critères d'appréciation des résultats

Les résultats ont été jugés à travers les 5 critères habituels : la sensibilité (Se), la spécificité (Sp), la valeur prédictive positive (VPP), la valeur prédictive négative (VPN) et l'efficacité ou valeur globale, dont les définitions et le mode de calcul sont indiqués au tableau 16. Ces critères sont calculés en référence aux résultats de comptages cellulaires du CIAL (méthode opto-fluoro-électronique).

Tableau 14 : Critères d'appréciation des résultats

Critère	Définition	Calcul
Sensibilité (Se)	(Quartiers jugés supérieurs au seuil de 800 000 cells/mL de la méthode du CIAL et supérieurs au seuil de l'appareil testé)/(Totalité des quartiers jugés supérieurs au seuil de 800 000 cells/mL de la méthode du CIAL)	$VP/(VP+FN)$
Spécificité (Sp)	(Quartiers jugés inférieurs au seuil de 300 000 cells/mL de la méthode du CIAL et inférieurs au seuil de l'appareil testé)/(Totalité des quartiers jugés inférieurs au seuil de 300 000 cells/mL de la méthode du CIAL)	$VN/(VN+FP)$
Valeur prédictive positive (VPP)	(Quartiers jugés supérieurs au seuil de 800 000 cells/mL de la méthode du CIAL et supérieurs au seuil de l'appareil testé)/(Totalité des quartiers jugés supérieurs au seuil de l'appareil testé)	$VP/(VP+FP)$
Valeur prédictive négative (VPN)	(Quartiers jugés inférieurs au seuil de 300 000 cells/mL de la méthode du CIAL et inférieurs au seuil de l'appareil testé)/(Totalité des quartiers jugés inférieurs au seuil de l'appareil testé)	$VN/(VN+FN)$
Efficiéce ou valeur globale	(Nombre total de bonnes décisions)/(Nombre total d'observations réalisées)	$(VN+VP)/Nbre\ Total$

La sensibilité peut être définie comme la probabilité pour qu'un quartier qualifié infecté par l'appareil testé soit également qualifié d'infecté par le comptage cellulaire du CIAL. En d'autres termes, l'appareil permet de déceler Se% des infections détectées par le CIAL.

La spécificité est la probabilité pour qu'un quartier considéré sain par l'appareil testé soit également jugé comme tel par le comptage cellulaire du CIAL. Autrement dit, Sp% des quartiers déclarés sains par le CIAL sont considérés comme tels par l'appareil testé.

La valeur prédictive positive est la proportion de quartiers détectés positifs par l'appareil testé confirmés par le comptage cellulaire du CIAL (VP) parmi le nombre total de quartiers détectés infectés par l'appareil testé. VPP% des quartiers suspectés par l'appareil testé sont effectivement jugés infectés par le CIAL.

La valeur prédictive négative est la proportion de quartiers non décelés infectés avec l'appareil testé confirmés par le comptage cellulaire du CIAL (VN) parmi le nombre total de quartiers non repérés infectés par l'appareil testé. VPN% des quartiers non suspectés sont effectivement non infectés.

L'efficacité correspond au pourcentage de résultats corrects, aussi bien positifs que négatifs, par rapport au test de référence.

3. Résultats

3.1. Etude de répétabilité des différents appareils de conductimétrie et de la méthode de référence

Avant de commencer la phase expérimentale proprement dite, une série de tests a été réalisée afin d'évaluer la répétabilité des valeurs absolues données par les trois appareils de conductimétrie ainsi que celle de notre méthode de référence : le comptage cellulaire réalisé selon la méthode officielle par les Centres Interprofessionnels d'Analyse Laitière (CIAL). Pour ce qui est du CMT et du compteur cellulaire DCC® Delaval, aucun test de répétabilité n'a été effectué.

3.1.1. Répétabilité des trois appareils de conductimétrie

Nous avons utilisé un lait considéré comme sain d'après un CMT négatif puis un lait de mammite d'après un CMT avec une note de 3. Des séries de 10 échantillons ont été préparés à partir des deux laits et les trois appareils ont été testés.

Tableau 15 : Etude de répétabilité sur du lait sain et du lait mammitieux du 4QMAST® et du MAS-D-TEC®

Echantillon	4QMAST®		MAS-D-TEC®	
	Sain	Infecté	Sain	Infecté
1	450	270	3	9
2	410	270	2	9
3	410	270	3	9
4	410	270	2	9
5	410	260	2	9
6	420	260	2	9
7	410	260	2	9
8	400	260	3	9
9	400	260	3	9
10	400	260	2	9
Moyenne	412	264	2.4	9
Ecart type	14.757	5.164	0.516	0
Coefficient de variation	0.036	0.019	0.215	0

3.1.2. Répétabilité de la méthode de référence

Pour évaluer la répétabilité de la méthode officielle des comptages cellulaires, 10 échantillons du même lait ont été analysés. Nous avons effectué ceci à 5 reprises avec différents lait. Les échantillons testés avaient des teneurs cellulaires moyennes de 16 500, 23 800, 69 100, 240 800 et 8 224 800 cellules/mL.

Tableau 16 : Etude de répétabilité de la méthode de référence

Série d'échantillons	Moyenne (cellules/mL)	Ecart type	Coefficient de variation
1	16 500	2 173	0.132
2	23 800	3 259	0.137
3	69 100	4 630	0.067
4	240 800	59 964	0.249
5	8 224 800	199 295	0.024

3.2. Résultats globaux

Le tableau 17 présente les résultats bruts des valeurs obtenues pour les différents tests.

Tableau 17 : Classement des résultats des valeurs absolues des différents tests par rapport au Somacount® (CIAL SO)

	CMT		Compteur DCC® Delaval		MAS-D-TEC®		4QMAST®		MMS 3010®	
VP	26	15,4%	18	15,5%	26	15,5%	10	6,1%	19	11,5%
VN	108	63,9%	75	64,6%	27	16,1%	83	50,3%	100	60,6%
FP	4	2,4%	0	0%	87	51,8%	0	0%	14	8,5%
FN	4	2,4%	3	2,6%	7	4,2%	12	7,3%	14	8,5%
Total	169		116		168		165		165	

Dans un premier temps, les échantillons classés « douteux » ont été exclus des calculs.

3.3. Résultats concernant le CMT

D'après les résultats du CIAL sur la totalité des échantillons testés on avait 34 échantillons positifs (> 300 000 cellules/mL), 21 échantillons douteux (entre 300 et 800 000 cellules/mL) et 114 négatifs (< 300 000 cellules/mL).

3.3.1. Résultats bruts

Les résultats concernant la comparaison entre la méthode de référence et le CMT figurent au tableau 18.

Tableau 18 : Comparaison des résultats du CMT et des CCS par la méthode opto-fluoro-électronique (CIAL)

CCS CIAL (cellules/m L)	CMT			
	0	T	> 1	Total
> 800 000	4	4	26	34
Douteux	13	6	2	21
< 300 000	108	2	4	114
Total	125	12	32	169

On a donc VP = 26 ; VN = 108 ; FP = 4 ; FN = 4.

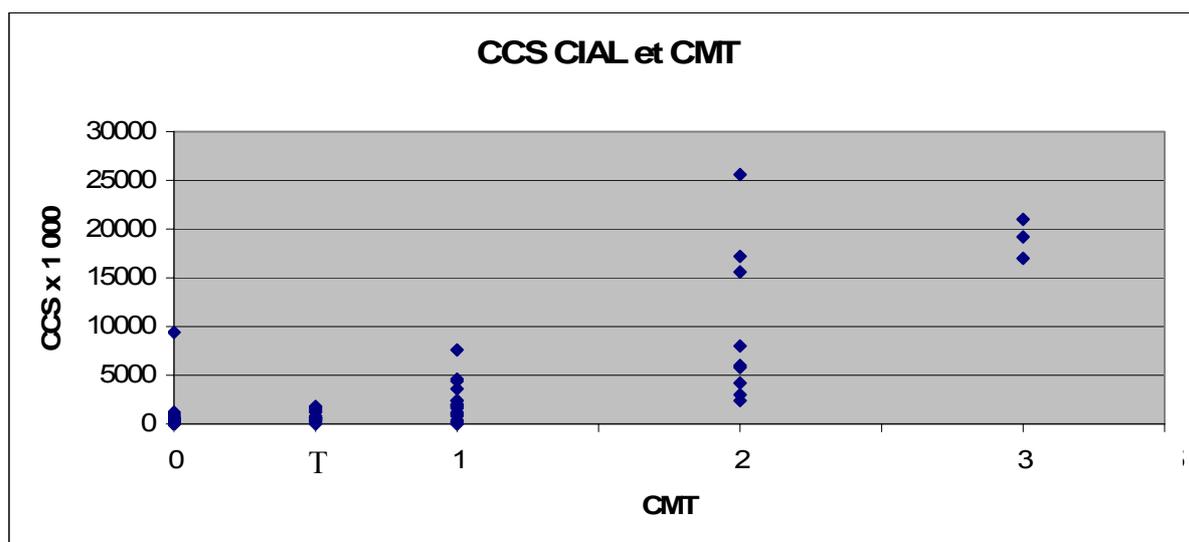


Figure 16 : Résultats comparés du CMT et des comptages cellulaires par la méthode opto-fluoro-électronique (CIAL)

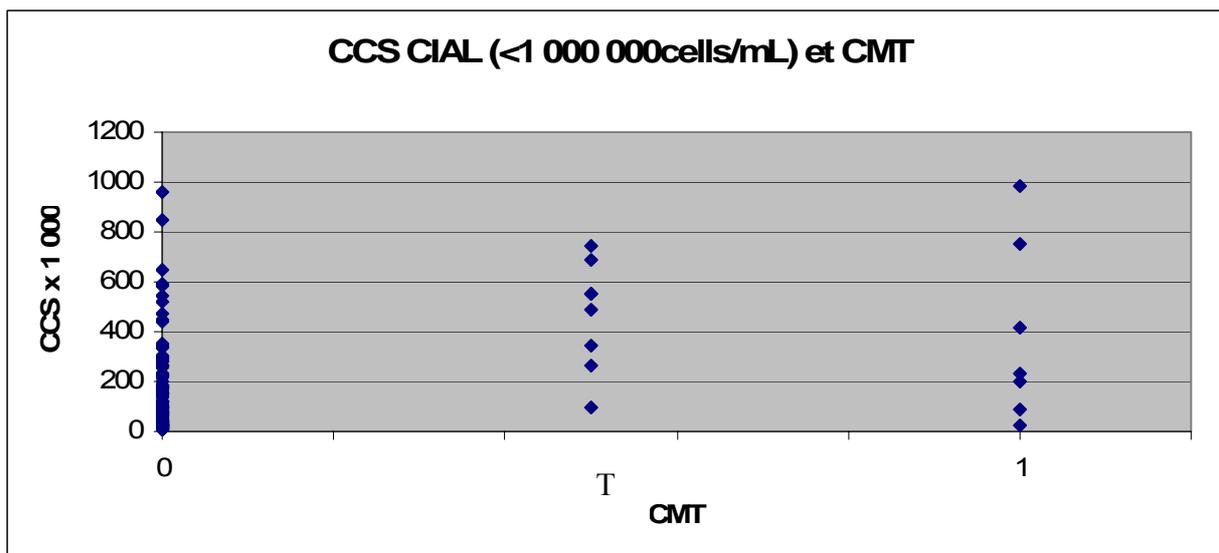


Figure 17 : Résultats comparés du CMT et des comptages cellulaires par la méthode opto-fluoro-électronique (CIAL) pour des valeurs inférieures à 1 000 000 cellules/mL

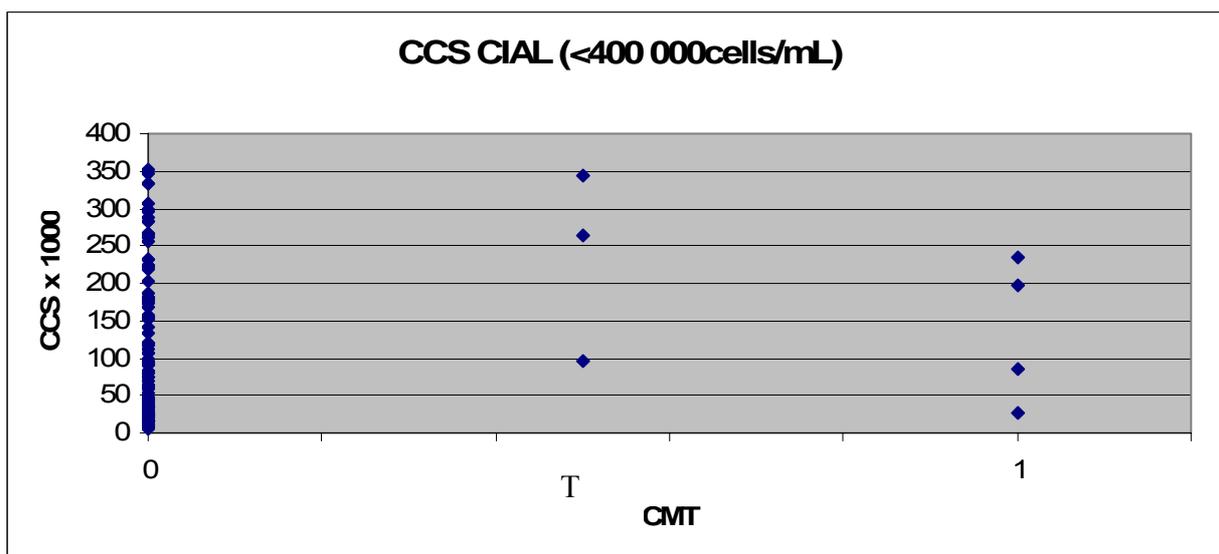


Figure 18: Résultats comparés du CMT et des comptages cellulaires par la méthode opto-fluoro-électronique (CIAL) pour des valeurs inférieures à 400 000 cellules/mL

3.3.2. Critères de jugement

Le tableau 19 donne les critères de jugement préalablement définis pour le CMT.

Tableau 19 : Critères de jugement du CMT

CMT	
Sensibilité	86,67%
Spécificité	96,43%
Valeur prédictive positive	86,67%
Valeur prédictive négative	96,43%
Efficiace	82,84%

3.4. Résultats concernant le compteur cellulaire DCC® Delaval

3.4.1. Résultats bruts

Les résultats concernant la comparaison entre la méthode de référence et le compteur DCC® Delaval figurent au tableau 20.

Tableau 20 : Comparaison des résultats du compteur DCC® Delaval et des CCS par la méthode opto-fluoro-électronique (CIAL)

CCS CIAL (cellules/mL)	Compteur DCC® Delaval (cellules/mL)				Total
	< 300 000	Douteux	> 800 000		
> 800 000	3	3	18		24
Douteux	6	7	0		13
< 300 000	75	4	0		79
Total	84	14	18		116

On a donc VP = 18 ; VN = 75 ; FP = 0 ; FN = 3.

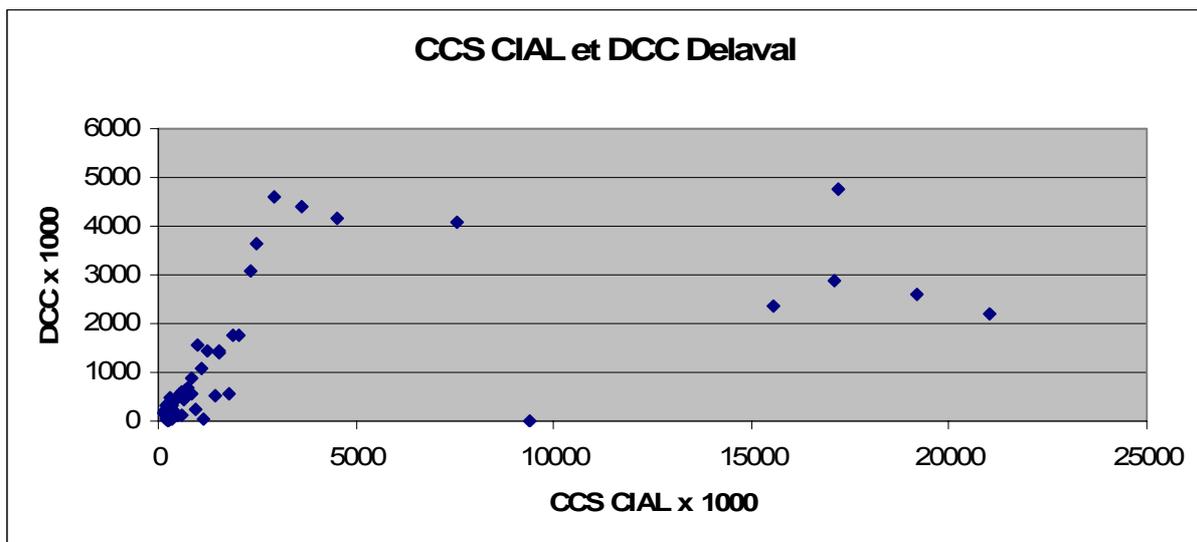


Figure 19 : Résultats comparés des comptages cellulaires issus du compteur cellulaire DCC® Delaval et par la méthode opto-fluoro-électronique (CIAL)

On a un coefficient de corrélation de 0.64.

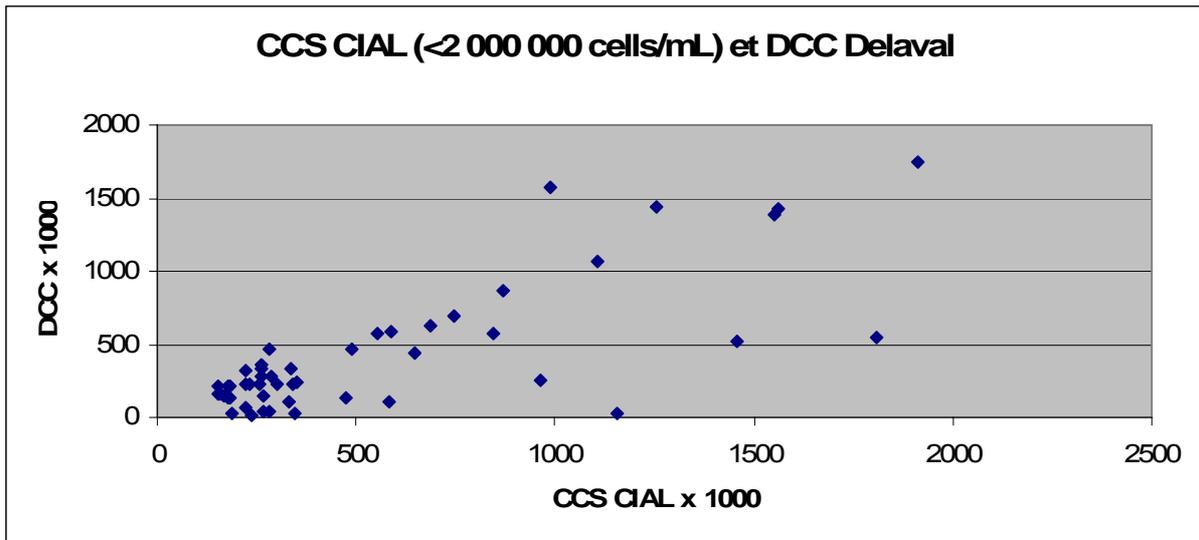


Figure 20 : Résultats comparés des comptages cellulaires issus du compteur cellulaire DCC® Delaval et par la méthode opto-fluoro-électronique (CIAL) pour des valeurs inférieures à 2 000 000 cellules/mL (CIAL)

On a un coefficient de corrélation de 0.83.

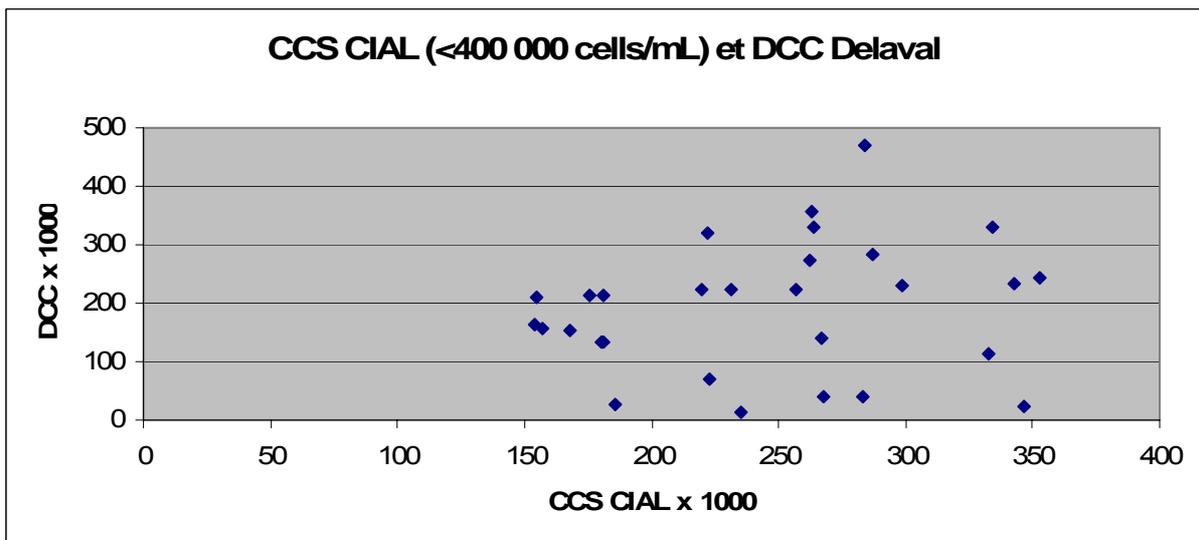


Figure 21 : Résultats comparés des comptages cellulaires issus du compteur cellulaire DCC® Delaval et par la méthode opto-fluoro-électronique (CIAL) pour des valeurs inférieures à 400 000 cellules/mL (CIAL)

On a un coefficient de corrélation de 0.65.

3.4.2. Critères de jugement

Le tableau 21 donne les critères de jugement préalablement définis pour le CMT.

Tableau 21 : Critères de jugement du compteur DCC® Delaval

Compteur DCC® Delaval	
Sensibilité	85,71%
Spécificité	100%
Valeur prédictive positive	100%
Valeur prédictive négative	96,15%
Efficiéce	86,21%

3.5. Résultats concernant le conductimètre MAS-D-TEC®

3.5.1. Résultats bruts

Les résultats en valeur absolue et en valeur relative (comparaison par rapport à la conductivité la plus faible) concernant le conductimètre MAS-D-TEC® figurent au tableau 22.

Tableau 22 : Comparaison des résultats du conductimètre MAS-D-TEC® et des CCS par la méthode opto-fluoro-électronique (CIAL)

CCS CIAL (cellules/mL)	MAS-D-TEC®			
	Valeurs absolues			
		< 5	≥ 5	Total
	> 800 000	7	26	33
	Douteux	10	11	21
	< 300 000	27	87	114
	Total	44	124	168
CCS CIAL (cellules/mL)	Valeurs relatives			
		Sain	Infecté	Total
	> 800 000	6	27	33
	Douteux	10	11	21
	< 300 000	27	87	114
	Total	43	125	168

On a donc VP = 26 ; VN = 27 ; FP = 87 ; FN = 7, lorsque l'on raisonne sur les quartiers indépendamment les uns des autres.

Si on compare les quartiers d'un même animal et si on considère comme l'indique le fabricant, qu'un quartier est considéré infecté si on a un écart de la valeur de diode d'au moins deux unités par rapport à un autre quartier, même si les valeurs sont < 5, on a alors VP = 27 ; VN = 27 ; FP = 87 ; FN = 6.

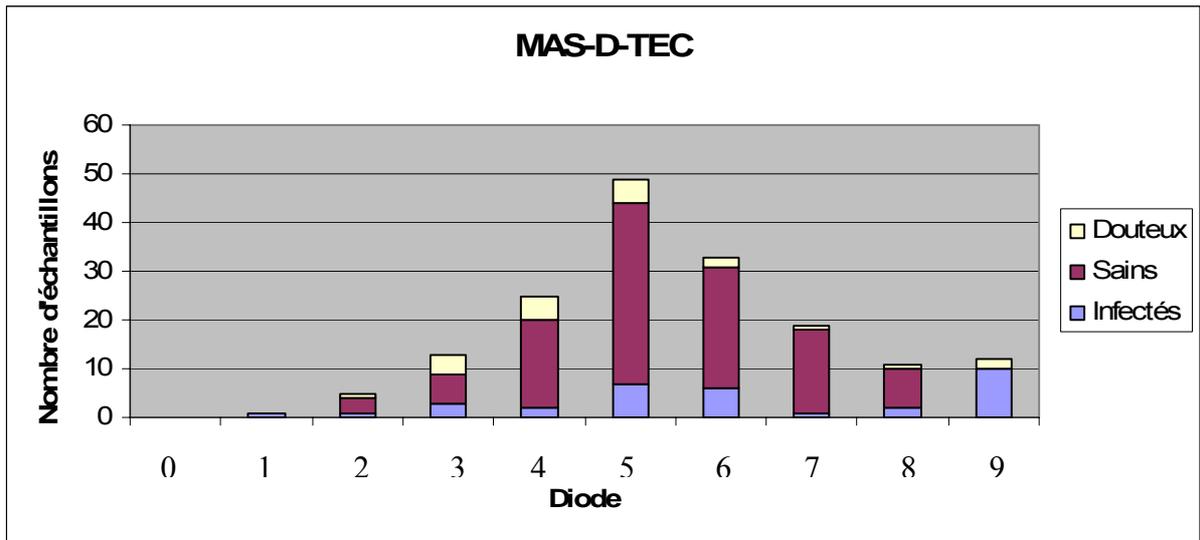


Figure 22 : Distribution des valeurs obtenues avec le MAS-D-TEC®

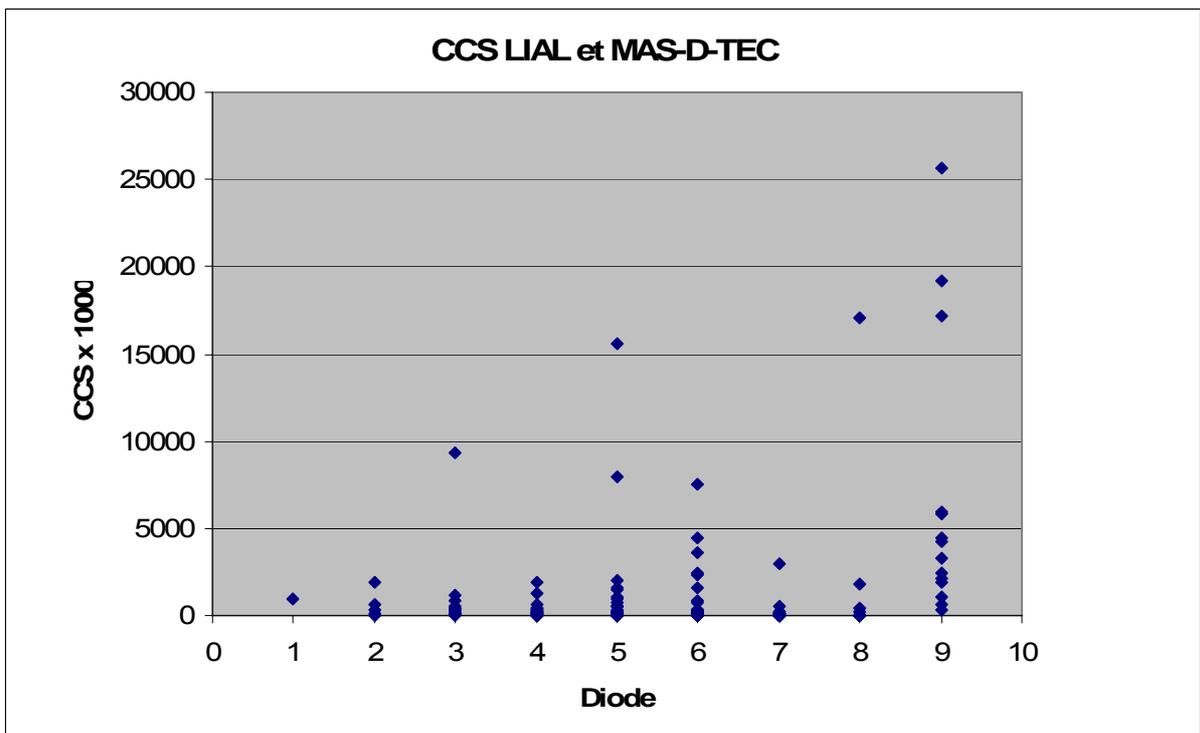


Figure 23 : Résultats comparés du MAS-D-TEC® et des comptages cellulaires par la méthode opto-fluoro-électronique (CIAL)

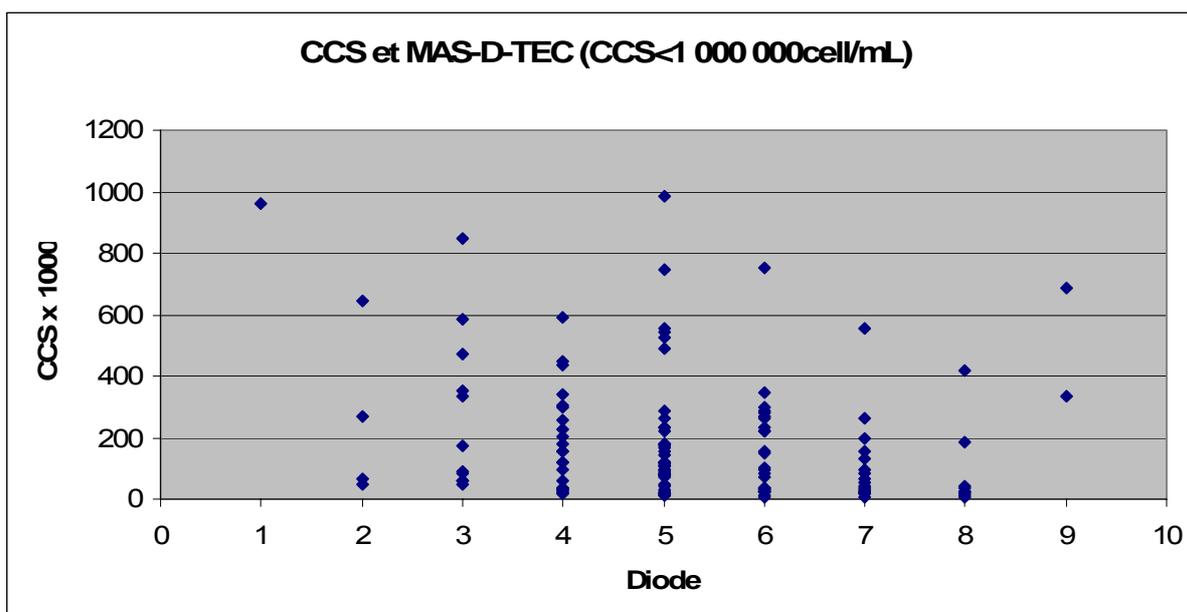


Figure 24 : Résultats comparés du CMT et des comptages cellulaires par la méthode opto-fluoro-électronique (CIAL) pour des valeurs inférieures à 1 000 000 cellules/mL

3.5.2. Critères de jugement

Le tableau 23 donne les critères de jugement préalablement définis pour le MAS-D-TEC®.

Tableau 23 : Critères de jugement du conductimètre MAS-D-TEC®

Conductimètre MAS-D-TEC®	Valeur absolue	Valeur relative
Sensibilité	78,79%	81,82%
Spécificité	23,68%	23,68%
Valeur prédictive positive	23,01%	23,68%
Valeur prédictive négative	79,41%	81,82%
Efficiencia	31,55%	32,14%

3.6. Résultats concernant le conductimètre 4QMAST®

3.6.1. Résultats bruts

Les résultats en valeur absolue et en valeur relative (comparaison par rapport à la conductivité la plus faible) concernant l'appareil de conductimétrie 4QMAST® figurent au tableau 24.

Tableau 24 : Comparaison des résultats du conductimètre 4QMAST® et des CCS par la méthode opto-fluoro-électronique (CIAL)

		4QMAST®			
		Valeurs absolues			
CCS CIAL (cellules/m L)		> 300	Douteux	< 250	Total
	> 800 000	12	12	9	33
	Douteux	10	7	1	18
	< 300 000	83	31	0	114
	Total	105	50	10	165
		Valeurs relatives			
CCS CIAL (cellules/m L)		Sains	Infectés	Total	
	> 800 000	19	14	33	
	Douteux	15	3	18	
	< 300 000	104	10	114	
	Total	138	27	165	

On a donc VP = 9 ; VN = 83 ; FP = 0 ; FN = 12, lorsque l'on raisonne sur les quartiers indépendamment les uns des autres.

Si on compare les quartiers d'un même animal en se référant aux recommandations du fabricant on obtient VP = 14 ; VN = 104 ; FP = 10 ; FN = 19.

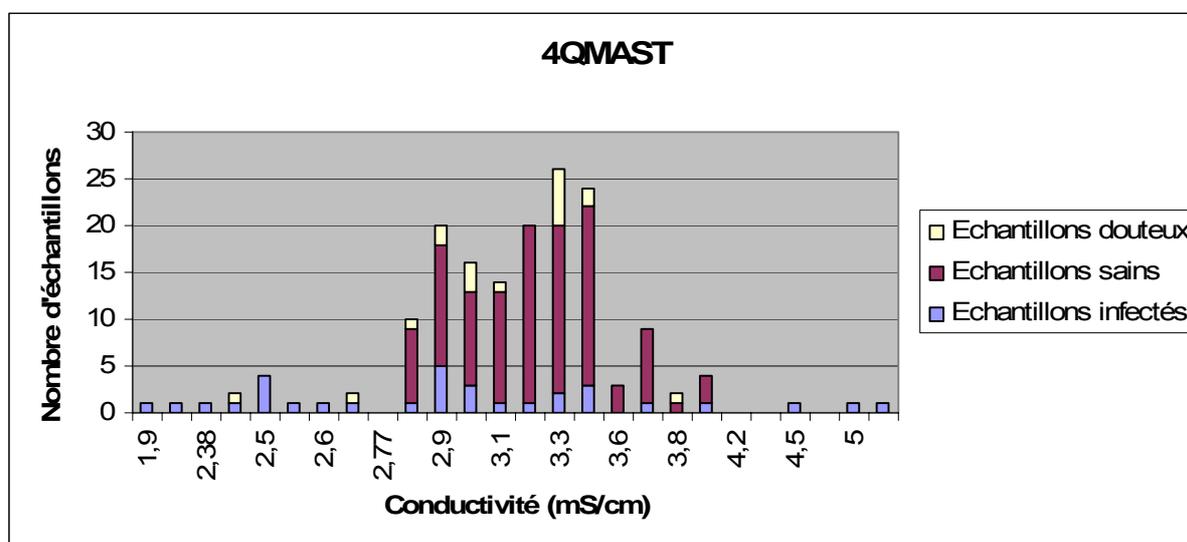


Figure 25 : Distribution des valeurs obtenues par le 4QMAST®

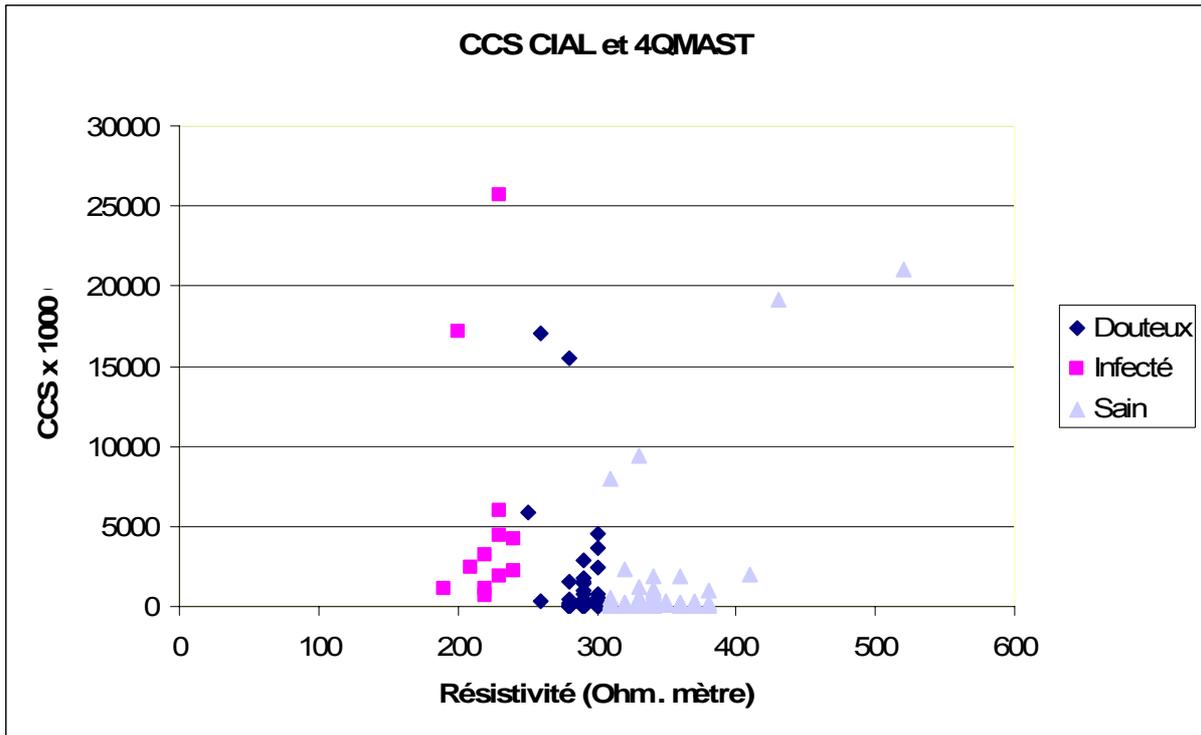


Figure 26 : Résultats comparés du 4QMAST® et des comptages cellulaires par la méthode opto-fluoro-électronique (CIAL)

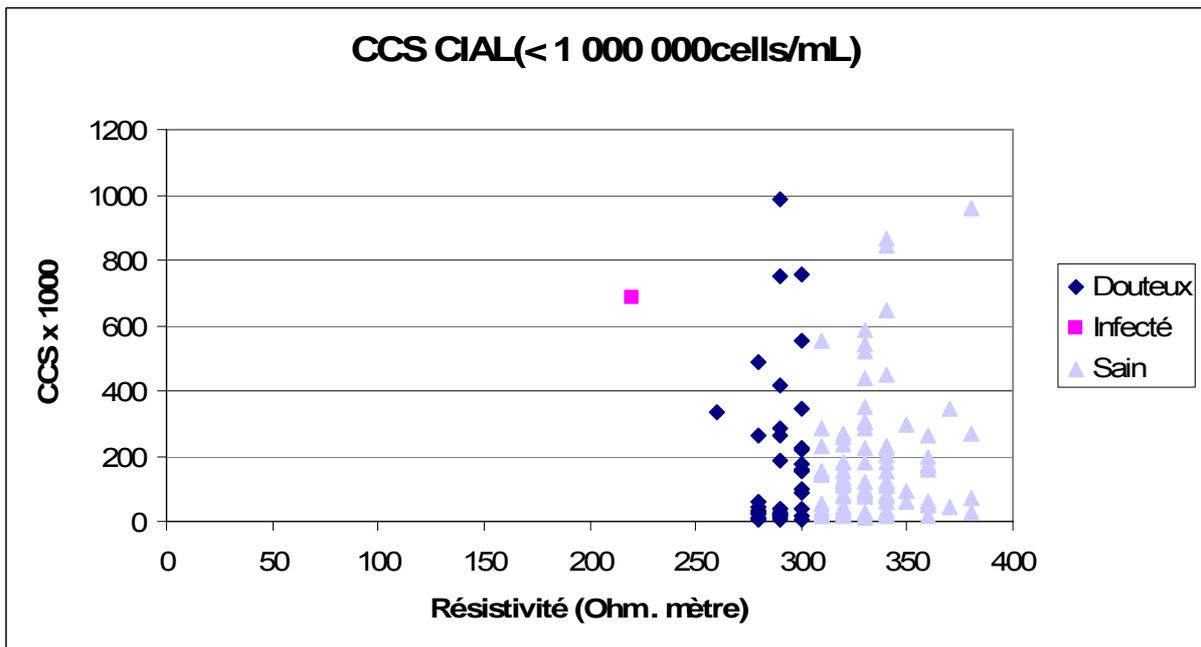


Figure 27 : Résultats comparés du MAS-D-TEC® et des comptages cellulaires par la méthode opto-fluoro-électronique (CIAL) pour des valeurs inférieures à 1 000 000 cellules/mL

3.6.2. Critères de jugement

Le tableau 25 donne les critères de jugement préalablement définis pour le 4QMAST®.

Tableau 25 : Critères de jugement du conductimètre 4QMAST®

Conductimètre 4QMAST®	Valeur absolue	Valeur relative
Sensibilité	42,86%	42,42%
Spécificité	100%	91,23%*
Valeur prédictive positive	100%	58,33%*
Valeur prédictive négative	87,37%	84,55%
Efficienne	60%	71,51%*

*significatif avec $p < 5\%$

3.7. Résultats concernant le conductimètre MMS3010®

3.7.1. Résultats bruts

Les résultats en valeur absolue et en valeur relative (en comparaison par rapport à la conductivité la plus faible) concernant l'appareil de conductimétrie MMS3010® figurent au tableau 26.

Tableau 26 : Comparaison des résultats du conductimètre MMS3010® et des CCS par la méthode opto-fluoro-électronique (CIAL)

CCS CIAL (cellules/mL)	MMS3010®		
	Valeurs absolues		
	Diode V	Diode R	Total
> 800 000	15	18	33
Douteux	12	6	18
< 300 000	100	14	114
Total	127	38	165
CCS CIAL (cellules/mL)	Valeurs relatives		
	Sain	Infecté	Total
> 800 000	22	9	31
Douteux	14	2	16
< 300 000	113	1	114
Total	149	12	161

On a donc $VP = 18$; $VN = 100$; $FP = 14$; $FN = 15$, lorsque l'on raisonne sur les quartiers indépendamment les uns des autres.

Si on compare les quartiers d'un même animal en se référant aux recommandations du fabricant on obtient $VP = 9$; $VN = 113$; $FP = 1$; $FN = 22$.

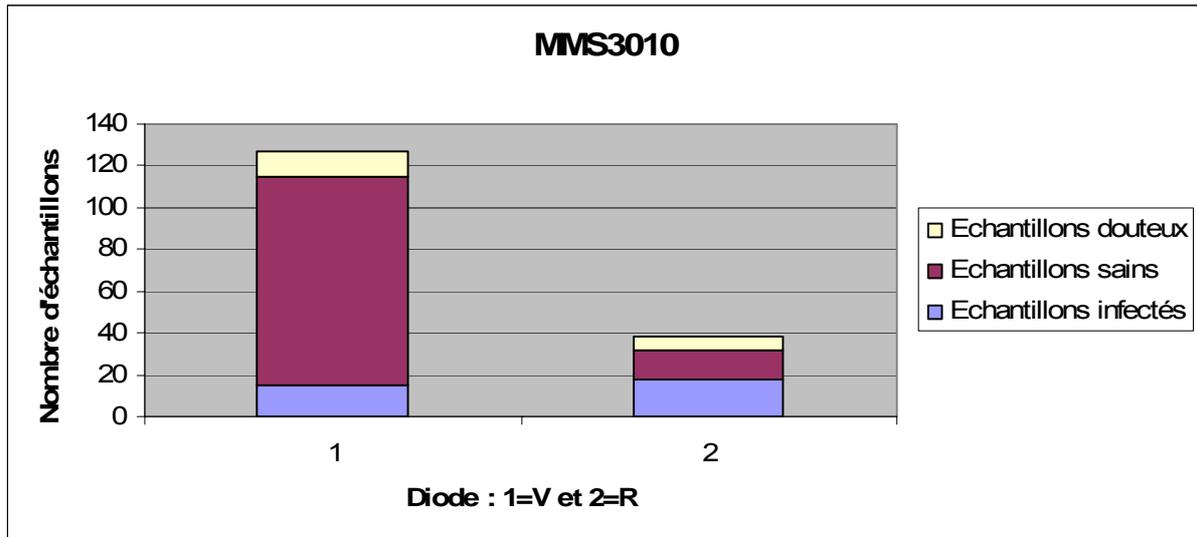


Figure 28 : Distribution des valeurs absolues obtenues par le MMS 3010®

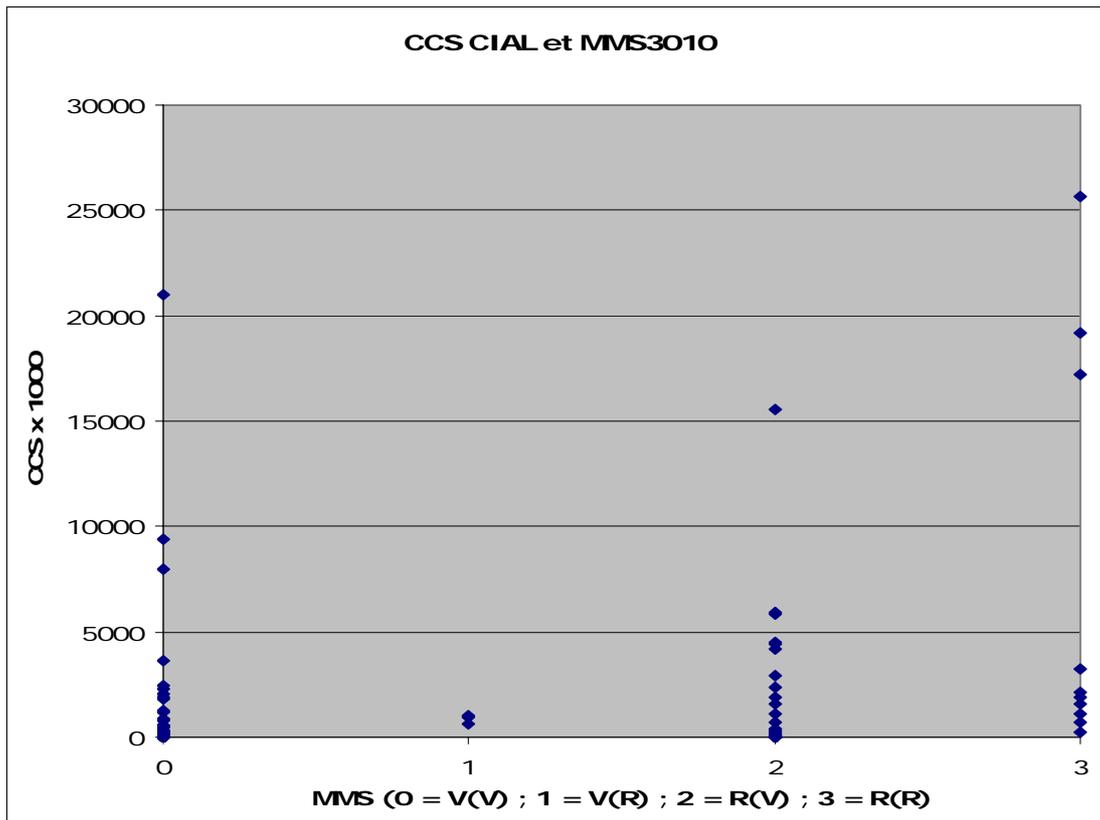


Figure 29 : Résultats comparés du MMS3010® et des comptages cellulaires par la méthode opto-fluoro-électronique (CIAL)

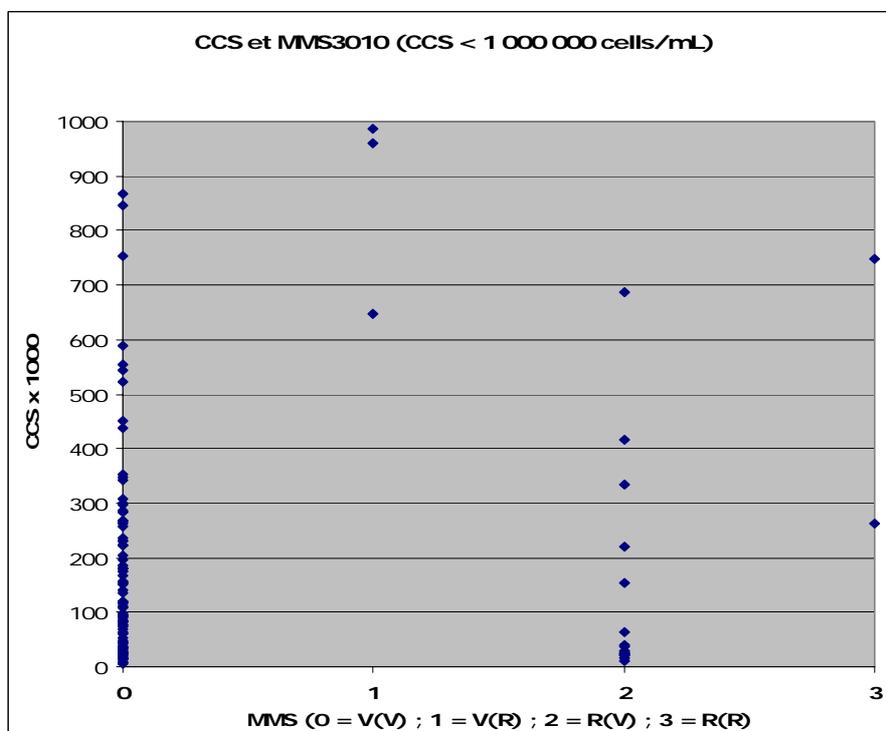


Figure 30 : Résultats comparés du MMS3010® et des comptages cellulaires par la méthode opto-fluoro-électronique (CIAL) pour des valeurs inférieures à 1 000 000 cellules/mL

3.7.2. Critères de jugement

Le tableau 27 donne les critères de jugement préalablement définis pour le MMS3010®.

Tableau 27 : Critères de jugement du conductimètre MMS3010®

Conductimètre MMS3010®	Valeur absolue	Valeur relative
Sensibilité	54,54%	29,03%*
Spécificité	87,72%	99,12%*
Valeur prédictive positive	56,25%	90%*
Valeur prédictive négative	86,96%	83,70%
Efficiace	71,51%	75,78%

*significatif avec $p < 5\%$

3.8. Détection des mammites cliniques et subcliniques

Nous avons dit précédemment que la conductivité électrique pouvait être utilisée pour la détection des mammites. Nous avons également vu que les modifications de la conductivité électrique du lait pouvaient varier en fonction du type de mammites. Etant donné que la demande des éleveurs se tourne essentiellement vers la recherche d'un outil d'aide à la détection des mammites subcliniques, nous avons recalculé les différents critères de jugement des cinq appareils comparés en distinguant le cas des mammites cliniques de celui des mammites subcliniques.

3.8.1. Mammites cliniques

Dans notre étude seulement 6 échantillons de lait sur 169 (soit 3,5% des échantillons) sont issus de vaches atteintes de mammites cliniques.

En raison du faible nombre de données concernant cette catégorie, nous ne nous prononcerons pas quant à l'efficacité de détection des différentes méthodes pour les mammites cliniques.

3.8.2. Mammites subcliniques

Ainsi en excluant les mammites cliniques, sur les 163 échantillons restant au total, 50 (soit 30,67%) sont issus de quartiers atteints de mammites subcliniques d'après les CCS du CIAL (> 300 000 cellules/mL).

Tableau 28 : Critères de jugement des différents appareils testés pour la détection des mammites subcliniques (valeurs absolues)

Appareil	Se (%)	Sp (%)	VPP (%)	VPN (%)	Efficienc (%)
CMT	84	96.43	84	96.43	79.14
Compteur DCC® Delaval	82.35	100	100	96.15	79.46
MAS-D- TEC®	75.86	23.01	20.18	78.79	29.45
4QMAST®	47.37	100	100	89.13	57.23
MMS3010®	57.14	87.61	53.33	89.19	72.33

Tableau 29 : Critères de jugement des différents appareils testés pour la détection des mammites subcliniques (valeurs relatives)

Appareil	Se (%)	Sp (%)	VPP (%)	VPN (%)	Efficienc (%)
MAS-D- TEC®	79.31	23.01	20.91	81.25	30.06
4QMAST®	35.71	91.15	50	85.12	71.07
MMS3010®	25.93	99.12	87.50	84.85	76.28

De manière générale, les critères ne varient pas beaucoup étant donné le faible nombre de mammites cliniques présentes dans notre étude. On observe une légère diminution de la Se aussi bien pour les valeurs absolues que pour les valeurs relatives, mais ces variations ne sont pas significativement différentes d'un point de vue statistique.

3.9. Influence du niveau du seuil de la méthode de référence sur les différents critères de jugement

Les résultats précédents ont été obtenus en comparant les différents appareils à la méthode de référence du comptage cellulaire effectué par la méthode opto-fluoro-électronique (CIAL). Le seuil fixé au delà duquel on considérait que le quartier était atteint de mammite subclinique était de 800 000 cellules/mL. En dessous de ce seuil, le quartier était considéré comme douteux ou sain. Nous avons recalculé les 4 critères de jugements vus précédemment (Se, Sp, VPP et VPN) en baissant le seuil de la méthode de référence à 300 000 cellules/mL de lait puis à 200 000 cellules/mL et finalement 100 000 cellules/mL. Les résultats obtenus sont rassemblés dans le tableau 30.

La ligne 3 correspond à l'utilisation du seuil de 300 000 cellules par mL de lait.

La ligne 2 correspond à l'utilisation du seuil de 200 000 cellules par mL de lait.

La ligne 1 correspond à l'utilisation du seuil de 100 000 cellules par mL de lait.

Les échantillons considérés comme douteux ont été pris en compte dans les calculs, puisqu'on s'intéresse principalement ici à la détection des quartiers infectés.

Tableau 30 : Critères de jugement en fonction du seuil de comptages cellulaires

	CMT	DCC®	MAS-D-TEC®		4QMAST®		MMS3010®	
			Absolu	Relatif	Absolu	Relatif	Absolu	Relatif
Se (%) 3	69.09*	75.68*	68.52	70.37	31.25	36.17	47.06*	23.40*
2	54.05*	82.69*	69.18	71.23	21.74	27.27	37.14	18.18
1	41.41*	92.49*	72.45	73.47	14.93	23.08	28.42*	13.19*
Sp (%) 3	94.74	94.94	23.68	23.68	100	91.53	87.72	99.12
2	95.79	95.31	23.16	23.16	100	90.91	87.37	100
1	95.71	92	24.29	24.29	100	91.89	84.29	100
VPP (%) 3	86.36*	87.50	29.84*	30.40*	100	62.96*	63.16	91.67*
2	90.91*	93.48	41.13*	41.60*	100	66.67*	68.42	100
1	93.18*	93.85	57.26*	57.60*	100	77.78*	71.05	100
VPN (%) 3	86.40*	89.29	61.36*	62.79*	79.44*	78.26*	78.74*	75.84*
2	72.80*	87.14	50*	51.16*	66.36*	65.22*	65.35*	63.76*
1	53.60*	90.20	38.64*	39.53*	46.73*	49.28*	46.46*	46.98*

*significatif avec $p < 5\%$

3.10. Influence du seuil des appareils de conductimétrie sur les différents critères de jugement

Dans un premier temps, les différents appareils de conductimétrie ont été utilisés en suivant les recommandations du fabricant, notamment en ce qui concerne le choix du seuil utilisé pour différencier les échantillons sains des échantillons infectés. Chacun des trois appareils possède déjà un seuil limite différent. Pour le MAS-D-TEC® il s'agit de 7 mS/cm, pour le MMS3010® c'est 6.5 mS/cm et pour le 4QMAST® c'est 4 mS/cm. Ainsi en toute rigueur pour comparer ces trois appareils il faudrait qu'ils possèdent tous le même seuil. En fonction des appareils rien ne nous empêche de choisir un seuil différent de celui proposé par le fabricant. Ceci n'est pas possible pour l'appareil MMS3010®, en revanche on peut tout à fait décider d'un seuil différent pour le MAS-D-TEC® et le 4QMAST®.

3.10.1. MAS-D-TEC®

Nous avons calculé les valeurs de sensibilité, spécificité, valeur prédictive positive et négative en fonction du seuil choisi.

Tableau 31 : Variations de *Se*, *Sp*, *VPP* et *VPN* de l'appareil MAS-D-TEC® en fonction du seuil de la diode choisi

Seuil	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Se (%)	100	98.15	94.44	81.48	68.52	28.09	31.48	27.78	22.22
Sp (%)	0	0	2.63	7.89	23.68	36.71	78.07	92.98	100
VPP (%)	32.14	31.74	31.48	29.53	29.84	33.33	40.48	65.22	100
VPN (%)	0	0	50	47.37	61.36	31.18	70.63	73.10	73.08

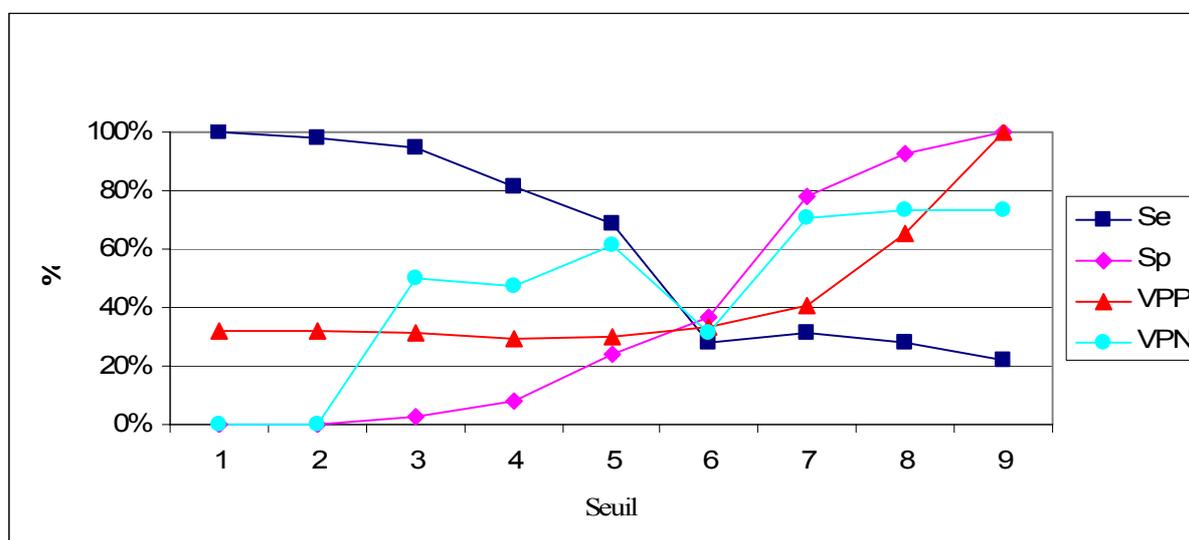


Figure 31 : Influence du choix du seuil sur la *Se*, *Sp*, *VPP* et *VPN*

Il apparaît d'après le graphique de la Figure 30, que le meilleur compromis soit une valeur seuil correspondant à la diode 5, ce qui correspond à ce que préconise le fabricant.

3.10.2. 4QMAST®

D'après le fabricant, trois catégories sont distinguées : infectés, douteux et sains. Nous avons recalculé la sensibilité, spécificité, valeur prédictive positive et valeur prédictive négative en considérant tous les résultats douteux comme infectés, puis ensuite en les considérant tous comme sains. Ce changement influe uniquement sur les valeurs absolues.

Tableau 32 : Critères de jugement en fonction du seuil du 4QMAST®

	Sensibilité	Spécificité	VPP	VPN
Douteux = infectés	56,86%	74,56%	50%	79,44%
Douteux = sains	19,61%	100%	100%	73,55%

4. Discussion

Au vu des résultats présentés dans les tableaux 13 et 14 des études de répétabilité des différents appareils (calcul de moyenne et d'écart type), on peut envisager l'utilisation de chacun d'eux pour évaluer la conductivité électrique du lait d'un animal.

4.1. Critères de jugements des différents appareils testés

4.1.1. CMT

La sensibilité du CMT atteint presque les 87%. Cela signifie que parmi les quartiers infectés mis en évidence par les comptages cellulaires effectués par le CIAL, 87% (presque 9 quartiers sur 10) sont également détectés comme tels par le CMT. La spécificité est meilleure, puisque plus de 96% (soit plus de 9 quartiers sur 10) des quartiers jugés sains par le CIAL le sont aussi par le CMT.

La VPP est de 86,67%, ce qui signifie qu'un peu plus de 8 quartiers sur 10 détectés par le CIAL le sont aussi par le CMT. La VPN est plus élevée (96,42%), ce qui revient à dire qu'un peu plus de 9 quartiers sur 10 non jugés infectés par le CIAL sont déclarés sains par le CMT.

L'efficacité du CMT par rapport au CIAL est bonne, puisque pratiquement 83% des résultats obtenus par le CMT concordent avec ceux obtenus par le CIAL.

4.1.2. Compteur DCC® Delaval

La sensibilité de l'appareil DCC® Delaval est proche de celle du CMT puisqu'elle est presque de 86%. Cela signifie que, parmi les quartiers infectés mis en évidence par la méthode de référence (CIAL), presque 86% (plus de 8 quartiers sur 10) sont également détectés comme tels par cet appareil. La spécificité quant à elle est meilleure que celle du CMT, puisqu'elle atteint le maximum de 100%, ce qui signifie qu'en théorie la totalité des quartiers jugés sains par le CIAL le sont aussi par l'appareil de DCC® Delaval.

La VPP est elle aussi maximale (100%), ce qui signifie que tous les quartiers détectés infectés par le CIAL le sont aussi par cet appareil. La VPN est elle aussi très importante puisqu'elle dépasse les 96%, ce qui revient à dire que plus de 9 quartiers sur 10 non jugés infectés par le CIAL sont déclarés sains par le compteur cellulaire Delaval.

L'efficacité du compteur cellulaire est légèrement supérieure à celle du CMT mais reste du même ordre de grandeur (86,21%).

4.1.3. MAS-D-TEC®

En valeur absolue, la sensibilité de l'appareil MAS-D-TEC® est de 78,79%. Cela signifie que parmi les quartiers infectés mis en évidence par les comptages cellulaires effectués par le CIAL, 78,79% (presque 8 quartiers sur 10) sont également détectés comme tels par cet appareil. Cependant la spécificité du MAS-D-TEC® est très faible, puisqu'à peine plus de 2 quartiers sur 10 (23,68%) jugés sains par le CIAL le sont aussi par le MAS-D-TEC®. Ceci est dû au nombre important de faux positifs.

Pour cette raison également, la VPP n'est que de 23,01%. Cela signifie qu'à peine plus de 2 quartiers sur 10 détectés infectés par le CIAL le sont également par le MAS-D-TEC®. Par contre la VPN est correcte puisqu'elle est de 79,41% ; ceci revient à dire que presque 8 quartiers sur 10 non jugés infectés par le MAS-D-TEC® sont aussi déclarés sains par les comptages cellulaires du CIAL.

En ce qui concerne l'efficacité de l'appareil, elle est très faible puisqu'on dépasse à peine les 30%.

En valeur relative, les différents critères de jugement ne changent pratiquement pas (pas de différence statistiquement significative après comparaison par un test de KHI DEUX avec un risque α de 5%).

4.1.4. 4QMAST®

En valeur absolue, la sensibilité de l'appareil 4QMAST® est faible (42,86%). Parmi les quartiers infectés mis en évidence par les comptages cellulaire effectués par le CIAL, 42,86% (à peine plus que 4 quartiers sur 10) sont également détectés comme tels par le 4QMAST®.

En revanche la spécificité de cet appareil est de 100%, la totalité des quartiers jugés sains par le CIAL le sont aussi en théorie par le 4QMAST®. Ceci est dû à l'absence de faux positifs. Il faut prendre du recul par rapport à ce résultat car de nombreuses valeurs n'ont pas été prises en compte dans les calculs. Nous avons en effet écarté les valeurs douteuses de l'appareil (valeurs affichées par l'appareil entre 250 et 300).

Du fait de l'absence de faux positifs, la VPP est elle aussi de 100%. Avec les mêmes réserves que précédemment, cela signifie que la totalité des quartiers détectés infectés par le CIAL le sont également par le 4QMAST®. La VPN elle aussi est élevée puisqu'elle atteint presque les 88% ; ceci revient à dire que presque 9 quartiers sur 10 non jugés infectés par le 4QMAST® sont aussi déclarés sains par les comptages cellulaires du CIAL.

L'efficacité de ce test est moyenne, puisqu'elle est seulement de 60%.

En valeur relative, la sensibilité ne varie pas (42,42%). La spécificité quant à elle est statistiquement différente et diminue en restant tout de même élevée (91,23%), c'est-à-dire que plus de 9 quartiers sur 10 jugés sains par le CIAL n'ont pas fait l'objet d'alerte positive par le 4QMAST®.

La VPP a elle aussi diminué significativement, mais beaucoup plus fortement pour s'établir aux alentours des 58%, ce qui peut se traduire en disant que pratiquement 6 quartiers sur 10 détectés infectés par le 4QMAST® l'ont été également avec le CIAL. En revanche la VPN est toujours du même ordre de grandeur (84,55% au lieu de 87,37% mais différence non significative).

Concernant l'efficacité, cette dernière augmente lorsqu'on raisonne en valeurs relatives, puisqu'elle dépasse les 70%.

4.1.5. MMS3010®

En valeur absolue, la sensibilité de l'appareil MMS3010® est de 54,54%. Cela signifie que parmi les quartiers infectés mis en évidence par les comptages cellulaires effectués par le CIAL, 54,54% (environ 5 quartiers sur 10) sont également détectés comme tels par le MMS3010®. La spécificité de cet appareil est élevée puisqu'elle atteint 87,72%, presque 9 quartiers sur 10 jugés sains par le CIAL le sont aussi par le MMS3010®. Ceci est dû au faible nombre de faux positifs.

La VPP est de 56,25%. Cela signifie qu'un peu moins de 6 quartiers sur 10 détectés infectés par le CIAL le sont également par le MMS3010®. La VPN elle est de 86,96% ; ceci revient à dire que quasiment 9 quartiers sur 10 non jugés infectés par le MMS3010® sont aussi déclarés sains par les comptages cellulaires du CIAL.

L'efficacité de cet appareil dépasse légèrement les 70%.

En valeur relative, tous les critères sont significativement différents d'un point de vue statistique (test de KHI DEUX avec α de 5%) sauf pour la VPN et l'efficacité du test. La sensibilité chute fortement jusqu'à 29,03%. Presque 3 quartiers sur 10 jugés infectés par le CIAL le sont aussi par le MMS3010®. Au contraire, la spécificité a augmenté (99,12%). La quasi-totalité des quartiers jugés sains par le CIAL n'ont pas fait l'objet d'alerte positive par le MMS3010®.

La VPP du MMS3010® est très bonne (90%), ce qui signifie que lorsqu'il indique que le quartier est infecté il y a 9 chances sur 10 pour que cela soit effectivement le cas. Autrement dit sur 10 quartiers détectés infectés par le MMS3010®, 9 l'ont également été par les comptages cellulaires du CIAL. La VPN a très légèrement diminué (83,70%) : plus de 8 quartiers sur 10 non détectés infectés par le MMS3010® n'ont pas été jugés infectés par le CIAL. Concernant l'efficacité, cette dernière augmente légèrement pour atteindre presque les 76%, sans toutefois que la différence soit significative.

4.2. Efficacité globale de détection des mammites chez les vaches

4.2.1. Récapitulatif des critères de jugements des différents appareils testés

Les tableaux 33 et 34 résument les principaux résultats relatifs aux différents appareils testés avec l'ensemble des résultats obtenus (mammites cliniques et subcliniques). Le tableau 29 concerne les valeurs absolues (mammites subcliniques) et le tableau 28 les valeurs relatives (mammites subcliniques) lorsqu'elles sont disponibles.

Tableau 33 : Critères de jugement des différents appareils testés (valeurs absolues) par rapport à la méthode opto-fluoro-électronique (CIAL)

Appareil	Se (%)	Sp (%)	VPP (%)	VPN (%)	Efficienc(%)
CMT	86.67	96.43	86.67	96.42	82.84
Compteur DCC® Delaval	85.71	100	100	96.15	86.21
MAS-D-TEC®	78.79	23.68	23.01	79.41	31.55
4QMAST®	42.86	100	100	87.37	60
MMS3010®	54.54	87.72	56.25	86.96	72.51

Tableau 34 : Critères de jugement des différents appareils testés (valeurs relatives) par rapport à la méthode opto-fluoro-électronique (CIAL)

Appareil	Se (%)	Sp (%)	VPP (%)	VPN (%)	Efficienc (%)
MAS-D-TEC®	81.82	23.68	23.68	81.28	32.14
4QMAST®	42.42	91.23	58.33	84.55	71.51
MMS3010®	29.03	99.12	90	83.70	75.78

4.2.2. Sensibilité

En valeur absolue, c'est le CMT qui a la meilleure sensibilité (86,67%) parmi l'ensemble des appareils testés et comparé aux comptages cellulaires faits par le CIAL. Ensuite il s'agit du compteur DCC® Delaval avec une valeur de sensibilité proche de 86%.

Parmi les trois conductimètres, qui ont tous une sensibilité inférieure aux autres appareils, c'est le MAS-D-TEC® qui a la sensibilité la plus élevée (78,79%) sans pour autant atteindre les 100% obtenus dans l'étude de Ghasemzadeh *et al.* (2002) [26]. Cette différence peut s'expliquer, entre autre, par la méthode de référence qui se trouve être la culture bactériologique. Ensuite les sensibilités sont nettement plus faibles pour les deux appareils restant, le MMS3010® (54,54%) et le 4QMAST® qui présente la valeur la plus faible (42,86%).

On peut ainsi dire que le compteur cellulaire DCC® Delaval, le CMT et le MAS-D-TEC® permettent une bonne détection des quartiers infectés (pas de différence significative d'un point de vue statistique). En revanche le MMS3010® et le 4QMAST® ne semblent pas véritablement intéressants pour repérer les quartiers infectés puisque dans le meilleur des cas, à peine plus de la moitié des quartiers véritablement infectés seront détectés par ces appareils.

Les trois conductimètres permettent de raisonner sur des valeurs relatives (comparaison des quartiers entre eux). Dans ce cas, la sensibilité augmente légèrement pour le MAS-D-TEC® mais reste malgré tout du même ordre de grandeur (pas de différence significative). Pour l'appareil MMS3010® on a une baisse importante et significative de la sensibilité qui tombe à 29,03%. Concernant le dernier appareil, le 4QMAST®, la baisse de la sensibilité est moins forte mais est tout de même significative (de 47,37 à 35,71%). Ainsi il ne semble pas, d'après ces résultats, qu'il soit intéressant de travailler en valeur relative puisque la sensibilité reste du même ordre de grandeur dans le meilleur des cas.

4.2.3. Spécificité

En valeur absolue, les spécificités des différents appareils sont toutes très élevées sauf pour le MAS-D-TEC® (seulement 23,68% ce qui est inférieur au 43,3% trouvé par Ghasemzadeh *et al.* (2002) [26]). C'est le compteur DCC® Delaval et le 4QMAST® qui ont la spécificité la plus élevée (100%) mais, comme nous l'avons dit précédemment, ce résultat est peut être surestimé car de nombreuses valeurs « douteuses » d'après les appareils ont été exclues des calculs. Ainsi d'une manière générale, tous ces appareils (sauf le MAS-D-TEC®) permettent une bonne détection des quartiers effectivement sains.

Lorsque l'on passe en valeur relative pour les trois appareils de conductimétrie, la spécificité augmente de manière significative pour le MMS3010® (de 87,72% à 99,12%), ne change pas pour le MAS-D-TEC® et baisse légèrement mais significativement tout en restant élevée pour le 4QMAST® (de 100% à 91,23%). Il peut donc être intéressant de travailler en valeur relative afin de pouvoir gagner en spécificité (Il est difficile d'interpréter la baisse de spécificité du 4QMAST® toujours pour les raisons évoquées précédemment).

4.2.4. Valeurs prédictives positive et négative

En valeur absolue, la valeur prédictive positive maximale est obtenue avec le compteur cellulaire Delaval et le 4QMAST® (100%). Vient ensuite le CMT avec une valeur de 86,67%. Puis les valeurs sont nettement plus faibles avec respectivement pour le MMS3010® et le MAS-D-TEC®, 56,25 et 23,01%. Concernant les valeurs prédictives négatives ces dernières sont moins dispersées. Ce sont le CMT et le compteur Delaval avec 96,42 et 96,15% qui ont les valeurs les plus élevées. Viennent ensuite le 4QMAST® et le MMS3010®

(respectivement 87,37 et 86,96%). La valeur la plus faible, mais tout de même correcte, revient au MAS-D-TEC® avec une VPN de 79,41%.

En valeur relative pour les trois conductimètres, les VPN restent du même ordre de grandeur, tout comme la VPP pour le MAS-D-TEC®. Par contre, on remarque une baisse importante de la VPP pour le 4QMAST® qui tombe à 58,33% alors qu'on observe une augmentation de la VPP pour le MMS3010® qui passe à 90%. Toutes ces variations sont significatives.

Il faut rappeler que les valeurs prédictives d'un test sont liées à la prévalence de l'affection dans l'effectif considéré. Ainsi, l'interprétation des VPP et VPN ne peut s'extrapoler ; elles ne sont interprétables que pour la prévalence observée dans notre étude à savoir 30% environ pour les mammites subcliniques.

4.2.5. Efficience des tests

L'efficience des tests correspond au pourcentage de bonnes décisions (ou de décisions concordantes). Le test le plus conforme au CIAL SO est le compteur DCC® Delaval, puisque 86,21% des résultats correspondent. Le CMT est proche avec une efficience de 82,84%.

Concernant les conductimètres, il n'y a pas de différence significative entre l'utilisation de valeurs absolues et de valeurs relatives. L'appareil le plus concordant avec le CIAL SO est le MMS3010® (plus de 70%), puis le 4QMAST® (entre 60 et 70%), en dernier vient le MAS-D-TEC® qui présente une efficience très faible (31 à 32%).

Ainsi, il est difficile de conclure quant à la possibilité d'utiliser des conductimètres portables dans le but de remplacer les comptages cellulaires ou le CMT. Il faudrait réaliser des études comparatives en utilisant la bactériologie comme test de référence ou, à défaut, un ensemble plus important de marqueurs de l'inflammation en plus des comptages cellulaires.

4.2.6. Compteur cellulaire DCC® Delaval

Cet appareil fonctionne selon le même principe que celui utilisé par la méthode de référence. Aucun test de répétabilité n'a été réalisé préalablement à notre étude car nous avons considéré cette méthode comme fiable. Il est difficile de comparer nos résultats avec ceux présentés

dans la bibliographie, tant les études diffèrent. La plupart du temps, lorsque l'on veut étudier l'efficacité des comptages cellulaires la méthode de référence utilisée est la culture bactériologique. Nous n'avons pas pu la réaliser pour des raisons financières. De manière globale et d'après les résultats de la bibliographie, la Se des comptages cellulaires varie entre 28,4 et 98,6%, la Sp entre 4,4 et 100%, la VPP entre 16 et 100% et la VPN entre 45,5 et 98%.

Tableau 35 : Valeurs de Se, Sp, VPP et VPN pour les comptages cellulaires par rapport à la bactériologie du lait d'après la bibliographie

Seuils (x10³ cells/ml)	Se (%)	Sp (%)	VPP (%)	VPN (%)	Référence
1 020	86.7	100	100	88.2	[59]
500	66	81	16	98	[71]
500	88	74	63	93	[71]
500	58	88	61	86	[71]
500	66.7	83.3	92.3	45.5	[63]
500	28.4 à 76.7	43.2 à 89.1			[66]
500	40 à 100	91 à 96			[83]
250	36.8	93.7	76.4	72.7	[2]
250	43.1 à 91.8	21.3 à 74.5			[66]
250	54.7	96.2	91	79	[65]
225	63	93.2	86	79	[65]
200-250	75	90			[67]
200	73 à 89	75 à 85			[65]
200	72.6	85.5	77	82	[65]
200	73 à 89	75 à 85			[61]
100	66.1 à 98.6	4.4 à 41.3			[66]
Non précisé	47	45			[58]

L'importante variation des valeurs peut s'expliquer, en plus du niveau du seuil choisi, par la prévalence des mammites dans le troupeau testé [65], la nature de l'infection mammaire (infection naturelle ou expérimentale) [63], la définition d'une mammite (une ou plusieurs cultures positives, différents pathogènes, mammites cliniques ou subcliniques...), la méthode d'évaluation des comptages cellulaires, la méthode de référence (culture bactériologique ou non), la fraction du lait prélevée, le stade de lactation des vaches... Dans ce tableau on remarque que nos propres résultats se trouvent dans la gamme des valeurs rapportées.

4.2.7. CMT

Le CMT est utilisé depuis longtemps et est reconnu comme un bon moyen de détection des mammites subcliniques en reflétant de manière indirecte les comptages cellulaires. Aucun test de répétabilité n'a donc été réalisé préalablement à notre étude. On trouve tout de même, encore une fois, des variations dans l'évaluation de l'efficacité de ce test au sein de la littérature. Quelques données sont présentées dans le tableau 36.

Tableau 36 : Valeurs de Se, Sp, VPP et VPN pour le CMT d'après la bibliographie

Seuil	Se (%)	Sp (%)	VPP (%)	VPN (%)	Référence
> 0	63.9	96	91.1	80.5	[2]
	38.2 à 66.7	54.4 à 61.2			[66]
	68.8	71.5	21.1	95.4	[14]
	82.4	80.6	42.4	96.3	[14]
	92	41	46	91	[38, 65]
> 1	17.4 à 39.7	82.4 à 88.9			[66]
	55.5	86.6	31.4	94.6	[14]
	72	64	52	81	[38, 65]
> 2	4.6 à 23.1	95.9 à 97.6			[66]

Il est encore une fois incorrect de comparer nos propres résultats à ces derniers car dans ces références le CMT est comparé à la méthode de référence, à savoir la culture bactériologique, ce qui n'est pas notre cas. Les facteurs de variations sont les mêmes que ceux évoqués précédemment, la méthode de référence, le choix du seuil, la fraction de lait prélevée...

En faisant abstraction de la méthode de référence et en considérant que les CCS issus de la méthode opto-fluoro-électronique reflètent correctement l'état de santé de la mamelle, les valeurs calculées dans notre étude sont en accords avec la littérature, avec cependant une VPP supérieure (86,67%) à celle de la majorité des références. Ceci s'explique par un très faible nombre de faux positifs dans notre étude.

4.2.8. Efficacité de détection des conductimètres portables

En ce qui concerne l'évaluation de l'efficacité des conductimètres portables dans le diagnostic de mammites, les résultats présentés dans la littérature sont encore plus variables que pour les méthodes précédentes. Dans le tableau 37, ne sont présentées que les études réalisées avec des appareils portables. Les méthodes de références utilisées varient en fonction des études (CMT, bactériologie et/ou comptages cellulaires).

Dans certaines études, plusieurs valeurs de Se, Sp, VPP et VPN sont données en raison du choix du seuil du conductimètre utilisé.

Tableau 37 : Valeurs de Se, Sp, VPP et VPN pour différents conductimètres portables d'après la bibliographie

Appareil	Se (%)	Sp (%)	VPP (%)	VPN (%)	Référence
Valeurs absolues					
Non précisé	35	65			[58]
AHI Plastic Moulding Co	90.6	67.2			[9]
Milk Checker®	51	71			[43]
Non précisé	30	89	41	83	[47]
	43	83	39	85	[47]
	55	69	32	86	[47]
	74	53	29	89	[47]
	87	30	24	90	[47]
Milk Checker®	72.8	53.4	36.6	84.2	[5]
Dramiński®	41.7	94.7	71.4	83.7	[5]
MMS 3000®	17.6	98.6	81.2	77.1	[5]
Mast O Test® 2.0	73.5	37.7	43	69.1	[5]
MAS-D-TEC®	100	43.3			[26]
Valeurs relatives					
Milk Checker®	33				[45]
	88				[45]
	92				[45]
MilkChecker®	91	17			[43]
Non précisé	30	90	44	84	[47]
	53	77	37	87	[47]
	81	26	22	85	[47]
Milk Checker®	63.8	84.5	60	86.5	[5]
MMS 3000®	38	92.6	66.7	79.3	[5]
Mast O Test® 2.0	40.3	88.6	69.1	70.7	[5]

Ainsi la Se varie de 17,6 à 100%, la Sp de 17 à 98,6%, la VPP de 22 à 81,2% et la VPN de 69,1 à 90%. Les éléments expliquant en partie ces variations sont les différentes méthodes de référence utilisées (culture bactériologique dans la plupart des cas, culture bactériologique + comptages cellulaires [9], CMT [5]), le type de mammites étudié (mammites subcliniques dans tous les cas sauf dans une étude [45]), le fait de travailler en valeurs absolues ou en valeurs relatives en comparant les quartiers entre eux [5, 43, 45, 47], le choix du seuil de

l'appareil [47], l'appareil de conductimétrie utilisé (en effet il peut y avoir des variations liées aux aspects techniques de l'appareil tels que le type d'électrodes utilisé, les caractéristiques des mesures du signal à savoir la fréquence, l'amplitude...), plus tous les facteurs de variations physiologiques exposés précédemment.

En effet, si on travaille sur des mammites cliniques plutôt que des mammites subcliniques, Milner *et al.* (1996) trouvent respectivement une Se de 92 et 33% et ceci pour le même agent pathogène mis en cause [45].

Le fait de travailler avec des valeurs relatives entraîne aussi des variations considérables [5, 47].

D'après les résultats issus de la littérature, on peut se dire que nos propres résultats se trouvent dans la gamme des valeurs rapportées, puisque dans le cas de l'utilisation des valeurs absolues ou des valeurs relatives, on a respectivement une Se qui varie de 42,86 à 78,79% et 29,03 à 81,82%, une Sp qui varie de 23,68 à 100% et 23,68 à 99,12%, une VPP qui varie de 23,01 à 100% et 23,68 à 90% et une VPN qui varie de 79,41 à 87,37% et 81,28 à 84,55%.

4.3. Valeurs absolues ou valeurs relatives

Nous avons vu précédemment [20, 25, 48, 53, 73] que le fait de travailler avec des valeurs relatives permettait de s'affranchir des sources de variations physiologiques susceptibles de provoquer une augmentation de la conductivité électrique du lait sans qu'il y ait de mammite associée.

En fonction des études, il apparaît que cette méthode serait plus efficace dans la détection des mammites à condition de partir du principe que les vaches présentant une mammite sur les quatre quartiers en même temps sont extrêmement rares.

Si on se base sur les résultats obtenus dans notre étude, le fait de raisonner sur les valeurs relatives n'améliore pas la détection globale des mammites subcliniques. La sensibilité et la VPN restent du même ordre de grandeur dans le meilleur des cas. En revanche cela augmente la spécificité et la VPP mais uniquement pour le MMS3010® (pas de changement pour le MAS-D-TEC® et diminution dans le cas du 4QMAST® mais pour ce dernier le nombre important de résultats douteux ne nous permet pas de conclure). Ainsi on peut espérer dans le

meilleur des cas une amélioration du nombre d'animaux sains considérés comme tels et de la confiance que l'on peut accorder à un résultat positif donné par l'appareil.

Le seuil suggéré pour l'utilisation du rapport entre les quartiers se situe entre 1.00 et 1.40 [48].

Dans notre étude, les seuils utilisés sont légèrement différents entre eux. Pour le MAS-D-TEC® le rapport utilisé est un écart de deux unités ce qui correspond à un seuil de 1.5, ce qui diffère de la recommandation précédente. Pour le 4QMAST® et le MMS3010® on se retrouve bien dans ce qui est préconisé par la littérature. On utilise une différence de 40 à 50 unités pour le 4QMAST® ce qui correspond à un seuil de rapport entre 1.13 et 1.17. Pour le MMS3010® le fabricant préconise un écart de 15%, tout comme Woolford *et al.* (1998) [83], ce qui correspond à un seuil de rapport de 1.15.

4.4. Influence du seuil de la méthode de référence sur les différents critères de jugement

4.4.1. CMT

Le fait de baisser le seuil de détection de la méthode de référence entraîne une nette dégradation de la sensibilité et de la valeur prédictive négative du test CMT. Malgré une légère augmentation de la valeur prédictive positive, ceci ne justifierait pas l'abaissement du seuil. La spécificité du CMT quant à elle n'est pas influencée par les variations du seuil. Pour utiliser efficacement le CMT dans la détection des mammites subcliniques il ne faut pas que le seuil de détection en méthode opto-fluoro-électronique soit trop sévère.

4.4.2. Compteur DCC® Delaval

De manière générale, l'abaissement du seuil de détection améliore l'ensemble des paramètres de jugement sans que cela soit significatif (on a une légère baisse de spécificité mais celle-ci reste du même ordre de grandeur). L'écart le plus important concerne la sensibilité qui passe de 75,68% pour un seuil à 300 000 cellules/mL à 92,49% pour un seuil à 100 000 cellules/mL. Ainsi en diminuant le seuil, on diminue le nombre de faux négatifs et on augmente au final la proportion de quartiers détectés réellement infectés.

D'après la littérature, il apparaît que le seuil physiologique le plus probable par rapport à la bactériologie serait de l'ordre de 200 000 à 250 000 cellules/mL. Avec ce seuil, on obtiendrait

une sensibilité (Se) de détection d'environ 75% et une spécificité (Sp) de 90% [67] par rapport à la bactériologie. Nos résultats diffèrent légèrement mais il ne faut pas oublier que dans notre étude ce n'est pas la culture bactériologique qui sert de référence.

Par la suite, au court de nos travaux, nous avons gardé le seuil de la méthode de référence à 300 000 cellules/mL afin de rester réaliste vis-à-vis des éleveurs (adhérents au contrôle laitier) et de leurs besoins. L'utilisation d'un seuil trop bas dans la pratique se révélerait anti-économique.

4.4.3. MAS-D-TEC®

Que ce soit en valeurs absolues ou en valeurs relatives, la sensibilité et la spécificité augmentent légèrement (sans que ce soit significatif). En revanche, la VPP augmente fortement en passant de 30% environ pour un seuil à 300 000 cellules/mL de lait à plus de 57% pour un seuil à 100 000 cellules/mL et ceci aussi bien lorsqu'on raisonne sur les valeurs absolues que relatives. Mais en contrepartie la VPN chute fortement de 62 % environ à 39% environ.

Ainsi, si on veut privilégier le nombre de détections correctes des quartiers infectés il faut être plus sévère vis-à-vis du seuil de la méthode, mais ceci sera au détriment du nombre de faux négatifs qui va nettement augmenter [47]. En revanche si on utilise cet appareil afin de s'assurer du caractère sain d'un quartier il ne faut en aucun cas diminuer le seuil car la probabilité qu'un quartier qualifié de sain par cet appareil le soit véritablement est faible (aux alentours de 39% seulement).

4.4.4. 4QMAST®

Lorsqu'on abaisse le seuil, les valeurs de sensibilité et surtout de la VPN diminuent assez fortement (la VPN passe de 79% environ pour un seuil à 300 000 cellules/mL de lait à moins de 50% pour un seuil à 100 000 cellules/mL et ceci aussi bien pour les valeurs absolues que pour les valeurs relatives). En ce qui concerne la spécificité, cette dernière reste pratiquement stable tout comme les VPP lorsque l'on raisonne avec les valeurs absolues alors qu'on observe une légère augmentation avec les valeurs relatives (passage de 62,96% à 77,78%). Ainsi on peut tout de suite affirmer qu'il n'y a aucun intérêt à diminuer le seuil de la méthode de référence lorsqu'on utilise cet appareil.

4.4.5. MMS3010®

Lorsque le seuil de la méthode de référence passe de 300 000 à 100 000 cellules/mL de lait, on remarque les mêmes variations observées pour le 4QMAST® à savoir une diminution de la sensibilité, de la spécificité de manière très légère (pour les valeurs absolues car pour les valeurs relatives la spécificité ne change pas étant donné qu'on a atteint le maximum) mais surtout de la VPN qui passe de 78,26% à 49,28% pour les valeurs absolues et de 75,84% à 46,98% pour les valeurs relatives. Donc pour cet appareil aussi, le fait d'être plus sévère avec le seuil de référence ne va pas vers une amélioration des critères de jugement de l'appareil mais au contraire vers une dégradation.

L'ensemble de ces observations confirme que l'efficacité de la détection des mammites en utilisant la conductivité électrique du lait dépend de la définition d'une mammite [53].

4.5. Influence du seuil des appareils de conductimétrie sur les différents critères de jugement

4.5.1. MAS-D-TEC®

Il semblerait que le choix du seuil de conductivité utilisé pour différencier quartier sain de quartier infecté soit un des éléments les plus importants dans les sources de variations rencontrées. Certaines études l'illustrent bien en montrant l'évolution de la sensibilité et de la spécificité d'un appareil de conductimétrie en fonction du seuil choisi [49]. Les variations vont pratiquement de 0 à 100% dans les deux cas [43, 69].

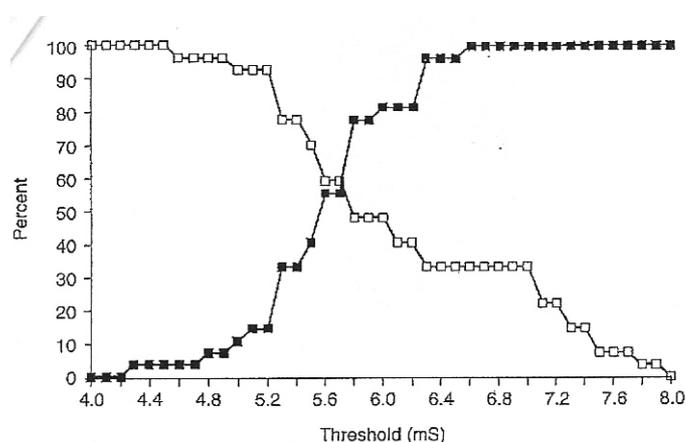


Figure 32 : Variations de la sensibilité (-□-) et de la spécificité (-■-) en fonction du seuil choisi [43]

Le seuil optimal à utiliser sera donc celui qui minimise le coût total du aux faux positifs et aux faux négatifs. Il faut prendre en compte la sensibilité, la spécificité, la prévalence de l'affection dans la population et le coût relatif engendré par les faux positifs et les faux négatifs.

Comme dans notre étude, la sensibilité diminue lorsque le seuil augmente alors que la spécificité augmente et inversement [43].

Ainsi, les auteurs recommandent en général l'utilisation d'un seuil élevé ce qui permet l'identification de la majorité des cas positifs, mais encore une fois tout dépend des objectifs de l'éleveur.

4.5.2. 4QMAST®

En ce qui concerne l'utilisation des valeurs absolues données par cet appareil, le fait de faire varier le seuil de décision influe sur les différents critères de jugement.

Si on est très sévère et que l'on considère que dans le doute les échantillons sont classés dans la catégorie infectés (ce qui correspond à un seuil de 3.33 mS/cm), on augmente la Se qui passe de 31,25% à 56,86%. En revanche, ceci entraîne une chute de la spécificité (de 100% à 74,56%) et de la VPP qui diminue de moitié (de 100% à 50%). Il n'y a aucune influence sur la VPN.

A l'opposé, si on classe les échantillons douteux dans la catégorie sains (ce qui correspond à un seuil de 4 mS/cm), la Se se dégrade fortement puisqu'elle tombe à 19,61%. La Sp quant à elle ne change pas et reste maximale (100%) et pour ce qui est de la VPP et de la VPN, elles ne varient pas.

Ces résultats sont en accord avec l'étude citée précédemment [43], le choix du seuil devra se faire en fonction des objectifs fixés par l'éleveur.

4.6. Prévalence des mammites au sein des élevages

Dans notre étude la prévalence globale des mammites (cliniques et subcliniques) a été calculée et est de 32,5% (prévalence des mammites cliniques de 3,5% mais non représentative en raison du faible effectif et prévalence des mammites subcliniques de 30,67%). Il est difficile de connaître les prévalences réelles des mammites en France puisque pour les mammites subcliniques les données se basent sur les CCS du Contrôle Laitier, ce qui ne

représente qu'une partie des élevages et pour les mammites cliniques aucun système d'enregistrement officiel n'existe. On peut tout de même essayer pour cette dernière de l'évaluer par l'intermédiaire du nombre de traitements intra-mammaires vendus par les vétérinaires et par le recueil des données du registre d'élevage, mais dans tous les cas les prévalences seront sous-estimées. Ainsi on trouve par exemple pour une population d'étude des Pays de la Loire, une prévalence instantanée (journalière) évaluée par les CCS, d'environ 1/3 des vaches infectées par un pathogène mineur ou majeur dans au moins un quartier [68]. En 2006, d'après le Contrôle Laitier on atteint une proportion de 35% de vaches infectées [32]. Ainsi la prévalence des mammites subcliniques dans notre étude n'est pas trop éloignée de la moyenne nationale, mais il ne faut pas oublier qu'il existe de grandes disparités en fonction des élevages et ce sont ces grandes variations qu'il faut prendre en compte dans l'interprétation de l'efficacité des tests de détection. C'est pourquoi on ne peut pas généraliser l'ensemble des résultats obtenus dans notre étude notamment ceux concernant les valeurs prédictives.

En ce qui concerne les mammites cliniques, des quantifications récentes de l'incidence concluent qu'il y aurait en France environ 44 à 45 cas pour 100 vaches présentes-année [23, 68].

D'après la littérature, lorsque la prévalence des mammites subcliniques est faible, la conductimétrie a une valeur prédictive positive (VPP) faible, c'est-à-dire que la probabilité que l'animal soit effectivement atteint de mammite lorsque le test donne un résultat positif est faible. En revanche la valeur prédictive négative (VPN) est élevée, ce qui revient à dire que la probabilité que l'animal soit sain lorsque le test donne un résultat négatif est importante. En revanche, lorsque la prévalence est supérieure à 60%, la VPP augmente et la VPN diminue [48].

Il est donc important de connaître la prévalence des mammites dans un élevage afin de mieux savoir quel poids donner aux résultats du test. Plus la prévalence est importante, plus le test aura la capacité de détecter avec certitude les animaux malades, au détriment de la détection des animaux sains et inversement lorsque la prévalence est faible. L'éleveur pourra d'autant plus faire confiance à l'appareil lorsque celui-ci indiquera un animal malade et que la prévalence sera importante. En revanche il devra prendre ses précautions pour les animaux détectés négatifs et peut-être envisager une autre méthode de diagnostic en complément pour être sûr du statut de l'animal. Même avec une sensibilité et une spécificité élevée, les résultats

de la conductivité du lait montrent une fréquence importante de faux positifs si la prévalence des cas cliniques est très faible [37].

En d'autre terme la conductivité du lait sera plus intéressante pour la détection des animaux malades dans les élevages où la prévalence des mammites est importante. Dans les élevages où la prévalence est faible, la conductivité sera plus efficace dans la détection des animaux sains.

Ceci peut expliquer en partie pourquoi dans notre étude on obtient plutôt des VPN supérieures aux VPP, sauf pour le 4QMAST® lorsque l'on raisonne sur les valeurs absolues et le MMS3010® lorsque l'on raisonne sur les résultats relatifs. Un des éléments de réponse à ces deux exceptions est quasiment l'absence de faux positifs, facilitée dans le cas du 4QMAST® par un grand nombre de valeurs classées douteuses par l'appareil et donc non prises en compte dans les calculs.

4.7. Fraction de lait testée

En raison des faibles quantités de lait prélevées pour chacun des tests, nous pouvons considérer que les variations de composition du lait entre les premiers jets utilisés pour le bol à fond noir et les jets utilisés pour le dernier appareil de conductimétrie sont minimales. Ceci est important à souligner car la teneur en cellules du lait est plus importante dans les premiers jets puis diminue ensuite au cours de la traite.

Au cours de notre étude, pour des raisons d'organisation, certains prélèvements ont été réalisés quelque temps après la traite du matin et non pas avant sur les premiers jets comme ce qui était décrit dans la partie « Matériels et Méthode ». Ceci n'a pas d'influence en terme d'efficacité de détection à en croire une étude qui a montré qu'il était plus efficace d'utiliser la conductivité électrique du lait pour la détection des mammites sur du lait de fin de traite (« strippings » sur le graphique) plutôt que sur les premiers jets (« foremilk » sur le graphique) [20].

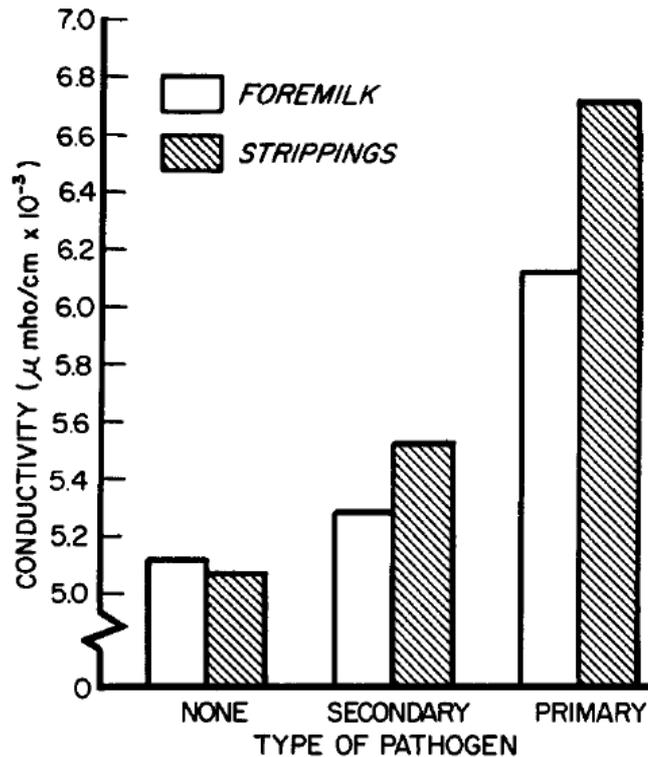


Figure 33 : Conductivité électrique du lait en fonction du statut infectieux et de la fraction de lait considérée [20]

Cependant d'autres études ne sont pas du même avis. Notamment Woolford *et al.* (1998), qui démontrent que la sensibilité de la conductivité électrique dans la détection des mammites subcliniques est plus élevée sur les premiers jets de lait [83].

Si on regarde nos résultats, sur les 40 échantillons obtenus après traite, 24 (soit 60%) ont engendré des faux positifs (19 pour le MAS-D-TEC® ce qui correspond à près de 22% de l'ensemble des faux positifs détectés par cet appareil et 5 pour le MMS3010®, soit presque 36% de l'ensemble des faux positifs détectés par cet appareil). Il semblerait donc plus judicieux d'utiliser ces appareils exclusivement sur du lait issu des premiers jets comme l'indiquent certaines études [21, 31, 50], ce qui est d'autant plus facile pour la mise en pratique par les éleveurs.

4.8. Faux positifs et faux négatifs

Certains éléments peuvent expliquer une partie des faux positifs ou faux négatifs de l'étude.

4.8.1. Race

Nous avons vu précédemment au cours de la première partie que la « race » pouvait avoir une influence sur la conductivité du lait [29].

Parmi nos trois conductimètres portables testés, seul le MAS-D-TEC® précise dans sa notice que l'appareil a été calibré pour être utilisé sur du lait de vache Prim'Holstein. Concernant le 4QMAST® et le MMS3010® aucune indication sur ce sujet n'est donnée.

Cependant, dans notre étude, toutes les vaches utilisées étaient de race Prim'Holstein, l'effet « race » n'a donc pas eu d'influence sur les résultats de nos travaux.

4.8.2. Température de l'échantillon

Nous avons vu que la température avait une influence sur la conductivité du lait. Or, parmi les trois conductimètres, un seul des appareils - le MMS3010® - possède une sonde de température et affiche le résultat pour une température de l'échantillon équivalente à 25°C. Les autres appareils ne possédant pas de sonde de température affichent un résultat pour une température d'échantillon proche de 37°C correspondant à la température du lait à la sortie de la mamelle.

Cette remarque peut expliquer en partie le fait que le nombre de faux positifs pour le MAS-D-TEC® soit plus important que pour le MMS3010®. Pour un même échantillon sain, la conductivité mesurée par le MAS-D-TEC® sera plus importante que celle mesurée par le MMS3010®, ce qui peut être à l'origine de faux positifs pour le MAS-D-TEC®.

Avec le même raisonnement, pour un échantillon infecté, la conductivité évaluée par le MMS3010® sera plus faible que celle mesurée par le MAS-D-TEC® ou le 4QMAST®, ce qui peut engendrer un nombre plus important de faux négatifs pour le MMS3010®.

4.8.3. Stade de lactation

Le stade de lactation peut engendrer des modifications de la conductivité du lait. Etant donné que nous n'avons aucune information concernant le stade de lactation des vaches prélevées lors de l'étude il nous est impossible d'évaluer son impact. Nous pouvons tout de même supposer que cet élément est à l'origine d'un certain nombre de faux positifs ou faux négatifs.

4.8.4. Motifs d'hospitalisation

L'une des particularités de notre étude est le fait que l'ensemble des vaches utilisées présentait une maladie ou une affection (Annexe n°4). Nous sommes donc loin des conditions réelles de terrain et il est légitime de penser que certains des résultats obtenus sont faussés en raison de l'état de santé général de l'animal. Ceci n'a cependant aucun impact concernant la comparaison de l'efficacité de détection des différents appareils puisque les échantillons testés sont tous les mêmes pour l'ensemble des appareils.

4.9. Nombre d'échantillons testés

Lors de notre étude, 169 échantillons ont été utilisables, c'est-à-dire qu'on disposait au minimum du résultat du CIAL et de celui d'un autre test. Pour des raisons techniques, certains résultats concernant des échantillons n'ont pu être enregistrés. C'est pourquoi on comptabilise un total de 116 échantillons pour l'appareil DCC® Delaval, 168 pour le MAS-D-TEC®, 117 pour la 4QMAST® et 165 pour le MMS3010®.

Conclusion

Les informations publiées sur l'utilisation de la conductivité électrique du lait comme indicateur de mammites montrent une grande variabilité de résultats. Si, d'un point de vue physiopathologique, la conductivité possède un potentiel incontestable dans la détection des mammites, notamment subcliniques, trop de facteurs non infectieux peuvent intervenir et fausser les résultats. Ainsi, il est impossible de fixer un seuil de conductivité définitif ou absolu au-delà duquel un lait pourrait être considéré comme positif et ce encore moins pour l'ensemble de la population-cible potentielle. Contrairement donc à ce qu'affirment différentes sociétés commerciales au travers de leur publicité, il n'existe pas à l'heure actuelle d'appareil capable de détecter efficacement les mammites subcliniques sur la simple valeur de la conductivité électrique ponctuelle du lait, quel que soit l'animal ou le troupeau. Une grande partie des études publiées suggère au contraire que la conductivité ne peut pas identifier un quartier malade ou une vache atteinte de mammité avec suffisamment d'exactitude par rapport aux comptages cellulaires ou au CMT.

Concernant les appareils portatifs, il faudrait, si un éleveur tient à utiliser ce type d'appareil, établir un protocole strict avec des conditions particulières d'utilisation telles que :

- s'assurer de la répétabilité de l'appareil.
- standardiser le plus précisément possible la méthode (toujours la même fraction de lait utilisée).
- effectuer un suivi et un enregistrement des valeurs.
- ne pas se contenter de mesures absolues d'un quartier et toujours comparer les quartiers entre eux.
- avoir une idée des facteurs de variations physiologiques de la conductivité (en particulier dans son élevage) et en connaître le sens de variation.
- connaître la prévalence des mammites dans l'élevage.

C'est seulement dans ces conditions que l'on peut espérer pouvoir utiliser un conductimètre portable (dont les performances resteront modestes), sans oublier tout de même qu'il vaut mieux disposer en plus d'un autre dispositif (par exemple le CMT) pour pouvoir confirmer ou non une suspicion.

De manière générale, les conductimètres portatifs sont plus fiables pour affirmer qu'un quartier est sain (utile par exemple au moment du tarissement) plutôt qu'infecté.

Dans cette optique, parmi les trois conductimètres testés et sur notre échantillon, si l'objectif de l'éleveur est de détecter le maximum d'animaux parmi ceux qui sont réellement sains, il peut être conseillé d'utiliser le 4QMAST® en valeurs absolues (spécificité la meilleure). En revanche, pour la détection des mammites subcliniques, le MMS3010® en valeurs relatives et le 4QMAST® en valeurs absolues semblent intéressants, mais seulement du point de vue des valeurs prédictives positives ; ces performances dépendent donc de la prévalence. Les sensibilités restent en effet médiocres.

Quoiqu'il en soit, ces appareils, malgré leurs avantages pratiques, ne peuvent prétendre au remplacement global du CMT du point de vue de l'efficacité et sans doute du coût. Ils représentent un bon exemple pour illustrer l'antagonisme sensibilité-spécificité en matière diagnostique. Il faut donc être très prudent face aux publicités commerciales et, en tant que vétérinaires, être en mesure de conseiller les éleveurs sur le choix d'une méthode en fonction de l'objectif de dépistage. Le conseil devrait aussi porter sur l'offre globale de dépistage des mammites, qui est devenue assez large : conductimètres portables ou en ligne, CMT dans ses diverses déclinaisons, CCS en LIAL, au pied de l'animal ou encore en ligne, etc...

Cette méthode utilisant la conductimétrie s'est cependant améliorée ces dernières années, notamment avec les systèmes en ligne ayant bénéficié de certains perfectionnements (une électrode par quartier, répétition d'une vingtaine de mesures à chaque traite, mémorisation des valeurs physiologiques de chaque animal, recoupement avec d'autres paramètres mesurés tels que les CCS, la couleur, le volume, la viscosité et la température du lait). Elle est cependant à son tour remise en « compétition » – ou en tout cas en comparaison – avec les systèmes miniaturisés de comptages cellulaires en ligne développés sur certains robots de traite. Reste tout de même encore le marché, en perte de vitesse, des machines à traire conventionnelles, pour lesquelles nous ne connaissons pas encore de compteur cellulaire vendu en option. Une fois encore, le marché, sur lequel se porte l'innovation technologique, imposera sans doute une partie des choix techniques même dans le domaine du dépistage des mammites.

-REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES-

[1] BARKEMA H.W., SCHUKKEN Y.H., LAM T.J.G.M., GALLIGAN D., BEIBOER M., BRAND A.

Estimation of interdependence among quarters of the bovine udder with subclinical mastitis and implications for analysis.

J. Dairy Sci., 1997, **80** : 1592-1599

[2] BATRA T.R., McALLISTER A.J.

A comparison of mastitis detection methods in dairy cattle.

Can. J. Anim. Sci., 1984, **64** : 305-312

[3] BAULEZ B.

Etiologie des mammites cliniques des ovins laitiers dans le bassin de Roquefort.

Th. : Med. Vet. : Toulouse : 2006 ; 4053. 65 p

[4] BIGGADIKE H.J., OHNSTAD I., LAVEN R.A., HILLERTON J.E.

Evaluation of measurements of the conductivity of quarter milk samples for the early diagnosis of mastitis.

The Veterinary Record, 2002, **150** : 655-658

[5] BILLON P., GAUDIN V., MOUCHY F.

Comparaison de la mesure de la conductivité du lait par quatre appareils portatifs avec le test CMT.

Institut de l'Elevage, Février 2003, Compte rendu n° 2033103 : 26 p

[6] BILLON P., MENARD J.L., BERNY F., GAUDIN V.

La détection des mammites par la mesure de conductivité électrique du lait.

Bulletin des GTV, 2001, **12** : 35-39

[7] CAVERO D., TÖLLE K.-H., BUXADE C., KRIETER J.

Mastitis detection in dairy cows by application of neural networks.

Livestock Science, 2008, **114** : 280-286

[8] CAVERO D., TÖLLE K.H., BUXADE C., KRITER J.

Mastitis detection in dairy cows by application of fuzzy logic.

Livest. Prod. Sci., 2006 ; **105** : 207-213

[9] CHAMINGS R.J., MURRAY G., BOOTH J.M.

Use of a conductivity meter for the detection of subclinical mastitis.

Veterinary Record, 1984, **114** : 243-245

[10] COULON J.B., DAUVER F., GAREL J.P.

Facteurs de variation de la numération cellulaire du lait chez des vaches laitières indemnes de mammites cliniques.

INRA Prod. Anim., 1996 ; **9 (2)** : 133-139

- [11] de **MOL R.M., KEEN A., KROEZE G.H., ACHTEN J.M.F.H.**
Description of a detection model for oestrus and diseases in dairy cattle based on time series analysis combined with a Kalman filter.
Computers and Electronics in Agriculture, 1999, **22** : 171-185
- [12] de **MOL R.M., KROEZE G.H., ACHTEN J.M.F.H., MAATJE K., ROSSING W.**
Results of a multivariate approach to automated oestrus and mastitis detection.
Livestock Production Science, 1997, **48** : 219-227
- [13] de **MOL R.M., OUWELTJES W.**
Detection model for mastitis in cows milked in an automatic milking system.
Preventive Veterinary Medicine, 2001, **49** : 71-82
- [14] **DINGWELL R.T., LESLIE K.E., SCHUKKEN Y.H., SARGEANT J.M., TIMMS L.L.**
Evaluation of the california mastitis test to detect an intramammary infection with a major pathogen in early lactation dairy cows.
Can. Vet. J., 2003, **44** : 413-416
- [15] **Directive 89/362/CEE de la Commission du 26 mai 1989 concernant les conditions générales d'hygiène des exploitations de production de lait.**
Journal officiel n° L 156 du 08/06/1989 p. 0030 - 0032.
Site internet EUR-Lex, (page consultée le 05 avril 2009).
Adresse URL : <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:31989L0362:FR:HTML>
- [16] **DJABRI B., BAREILLE N., BEAUDEAU F., SEEGER H.**
Quarter milk somatic cell count in infected dairy cows : a meta-analysis.
Vet. Res., 2002, **33** : 335-357
- [17] **EMANUELSON U., OLSSON T., HOLMBERG O., HAGELTORN M., MATTILA T., NELSON L., ASTRÖM G.**
Comparison of some screening tests for detecting mastitis.
J. Dairy Sci., 1987, **70** : 880-887
- [18] **Encyclopédie WIKIPEDIA** (page consultée le 29 avril 2009)
Adresse URL : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Accueil>
- [19] **ERSKINE R.J., WILSON R.C., RIDDELL M.G., TYLER J.W., SPEARS H.J., DAVIS B.S.**
Intrammary administration of gentamicin as treatment for experimentally induced *Escherichia coli* mastitis in cows.
Am. J. Vet. Res., 1992, **53** : 375-381
- [20] **FERNANDO R.S., RINDSIG R.B., SPAHR S.L.**
Electrical conductivity of milk for detection of mastitis.
J. Dairy Sci., 1982, **65** : 659-664

[21] FERNANDO R.S., SPAHR S.L., JASTER E.H.

Comparison of electrical conductivity of milk with other indirect methods for detection of subclinical mastitis.

J. Dairy Sci., 1985, **68** : 449-456

[22] FERROUILLET C., BOUCHARD E., CARRIER J.

Diagnostic indirect des mammites subcliniques.

Le Point Vétérinaire, 2004, **248** : 42-46

[23] FOURICHON C., BEAUDEAU F., BAREILLE N., SEEGER H.

Incidence of health disorders in dairy farmings systems in western France.

Livest. Prod. Sci., 2001 ; **68** : 157-170

[24] FOURICHON C., SEEGER H., BEAUDEAU F., VERFAILLE L., BAREILLE N.

Health-control costs in dairy farming systems in western France.

Livest. Prod. Sci., 2001 ; **68** : 141-156

[25] GEBRE-EGZIABHER A., WOOD H.C., ROBAR J.D., BLANKENAGEL G.

Evaluation of automatic mastitis detection equipment.

J. Dairy Sci., 1979, **62** : 1108-1114

[26] GHASEMZADEH-NAVA H., HOSSEINI M.R., GHARAGOZLOO F.

Sensitivity and specificity of MAS-D-TEC to detect subclinical mastitis in dairy cattle.

J. Anim. Sci., Vol **80**, Suppl. 1 / *J. Dairy Sci.* 2002, Vol. **85**, Suppl. 1 : p 376

[27] GOODLING R.C., ROGERS G.W., COOPER J.B., RUNE B.

Genetic relationships among electrical conductivity of milk, somatic cell scores and mastitis.

J. Anim. Sci., 2001 ; **79** : p 484

[28] GOODLING R.C., ROGERS G.W., COOPER J.B., RUNE B.

Heritability estimates for electrical conductivity of milk and correlations with predicted transmitting abilities for somatic cell scores.

J. Anim. Sci., 2000 ; **78** (Suppl.1) : p 71

[29] HAMANN J., ZECCONI A.

Evaluation of the electrical conductivity of milk as a mastitis indicator.

Bulletin of the IDF, 1998, **334** : 26 p

[30] HERINGSTAD B., KLEMESDAL G., RUANE J.

Selection for mastitis resistance in dairy cattle : a review with focus on the situation in the Nordic countries.

Livest. Prod. Sci., 2000 ; **64** : 95-106

[31] HILLERTON J.E., WALTON A.W.

Identification of subclinical mastitis with a hand-held electrical conductivity meter.

The Veterinary Record, 1991, **128** : 513-515

[32] INRA : Commission des Recherches Bovines.

La résistance aux maladies : Nouveaux enjeux, nouvelles recherches. Rapport sur la session printemps 2006, le 11 et 12 avril 2006 à Jouy en Josas, France

[33] ISAKSSON A., PHILIPS A.C., GÖRANSSON E., BJÖRKENFELDT H.

The electrical conductivity of bovine milk in mastitis diagnosis.

Acta Vet. Scand., 1987, **28(3-4)** : 455-457

[34] JONES L.R., SPAHR S.L., PUCKETT H.B.

Variability and reliability of real-time milk conductivity data.

J. Dairy Sci., 1994, **77** : 80-83

[35] KAMPHUIS C., PIETERSMA D., van der TOL R., WIEDEMANN M., HOGEVEEN H.

Using sensor data patterns from an automatic milking system to develop predictive variables for classifying clinical mastitis and abnormal milk.

Computers and electronics in agriculture, 2008, **62** : 169-181

[36] KITCHEN B.J.

Review of the progress of Dairy Science : Bovine mastitis : milk compositional changes and related diagnostic tests.

J. Dairy Res., 1981, **48** : 167-188

[37] LANSBERGEN L.M.T.E., NIELEN M., LAM T.J.G.M., PENGOV A., SCHUKKEN Y.H., MAATJE K.

Evaluation of a prototype on-line electrical conductivity system for detection of subclinical mastitis.

J. Dairy Sci., 1994, **77** : 1132-1140

[38] LESLIE K.E., JANSEN J.T., LIM G.H.

Opportunities and implications for improved on farm cowside diagnostics.

Proc DeLaval Hygiene Symp., 2002 : 147-160

[39] LINZELL J.L., PEAKER M.

Efficacy of the measurement of the electrical conductivity of milk for the detection of subclinical mastitis in cows : detection of infected cows at a single visit.

Br. Vet. J., 1975, **131** : 447-461

[40] MAATJE K., HUIJSMANS P.J.M., ROSSING W., HOGWERF P.H.

The efficacy of in-line measurement of quarter milk electrical conductivity, milk yield and milk temperature for the detection of clinical and subclinical mastitis.

Livestock Production Science, 1992, **30** : 239-249

[41] MABROOK M.F., PETTY M.C.

Application of electrical admittance measurements to the quality control of milk.

Sensors and Actuators B., 2001, **84** : 136-141

[42] MABROOK M.F., PETTY M.C.

Effect of composition on the electrical conductance of milk.

Journal of food engineering, 2003, **60** : 321-325

[43] MANSELL P.D., SEGUYA A.

The use of a hand-held conductivity meter for the diagnosis of subclinical mastitis in dairy cows during late lactation.

New Zealand Veterinary Journal, 2003, **51(1)** : 21-25

[44] MANSFELD R., MANSFELD S., SANTL B., HOEDEMAKER M.

New aspect regarding the use of the milk electrical conductivity as a parameter for routine diagnostics in dairy production medicine programs.

In : *2nd Int. Symposium on Bovine Mastitis and Milk quality*, Vancouver, Canada, 2001, 488-489

[45] MILNER P., PAGE K.L., WALTON A.W., HILLERTON J.E.

Detection of clinical mastitis by changes in electrical conductivity of foremilk before visible changes in milk.

J. Dairy Sci., 1996, **79** : 83-86

[46] MULDOON P.J., LISKA B.J.

Chloride ion activity for detection of abnormal milk.

J. Dairy Sci., 1971, **54 (1)** : 117-119

[47] MUSSER J.M.B., ANDERSON K.L., CABALLERO M., AMAYA D., MAROTO-PUGA J.

Evaluation of a hand-held electrical conductivity meter for detection of subclinical mastitis in cattle.

AJVR, 1998, **59 (9)** : 1087-1091

[48] NIELEN M., DELUYKER H., SCHUKKEN Y.H., BRAND A.

Electrical conductivity of milk : measurement, modifiers, and meta analysis of mastitis detection performance.

J. Dairy Sci., 1992, **75** : 606-614

[49] NIELEN M., SCHUKKEN Y.H., BRAND A., DELUYKER H.A., MAATJE K.

Detection of subclinical mastitis from on-line milking parlor data.

J. Dairy Sci., 1995, **78** : 1039-1049

[50] NIELEN M., SCHUKKEN Y.H., BRAND A., HARING S., FERWERDA VAN ZONNEVELD R.T.

Comparison of analysis techniques for on-line detection of clinical mastitis.

J. Dairy Sci., 1995, **78** : 1050-1061

[51] NIELEN M., SCHUKKEN Y.H., VAN DE BROEK J., BRAND A., DELUYKER H.A., MAATJE K.

Relations between on-line electrical conductivity and daily milk production on a low somatic cell count farm.

J. Dairy Sci., 1993, **76** : 2589-2596

[52] NORBERG E.

Electrical conductivity of milk as a phenotypic and genetic indicator of bovine mastitis : a review.

Livestock Production Science, 2005, **96** : 129-139

[53] NORBERG E., HOGEVEEN H., KORSGAARD I.R., FRIGGENS N.C., SLOTH K.H.M.N., LOVENDAHL P.

Electrical conductivity of milk : ability to predict mastitis status.

J. Dairy Sci., 2004, **87** : 1099-1107

[54] NORBERG E., ROGERS G.W., GOODLING R.C., COOPER J.B., MADSEN P.
Genetic parameters for test-day electrical conductivity of milk for first lactation cows from random regression models.

J. Dairy Sci., 2004, **87** : 1917-1924

[55] NORBERG E., ROGERS G.W., MADSEN P.

Genetic parameters for electrical conductivity of milk.

In : *Proc. 55th Annual EAAP Meeting*, Bled, 5-9 September 2004

[56] NORBERG E., ROGERS G.W., ODEGARD J., COOPER J.B., MADSEN P.

Short communication : genetic correlation between test-day electrical conductivity of milk and mastitis.

J. Dairy Sci., 2006, **89** : 779-781

[57] ODEGARD J., HERINGSTAD B., KLEMETSDAL G.

Short communication : bivariate genetic analysis of clinical mastitis and somatic cell count in norwegian dairy cattle.

J. Dairy Sci., 2004, **87** : 3515-3517

[58] OKIGBO L.M., SHELIAH M.A., RICHARDSON G.H., ERNSTROM C.A., BROWN R.J., TIPPETTS E.L.

Portable conductivity meter for detecting abnormal milk.

J. Dairy Sci., 1984, **67** : 1510-1516

[59] PEAKER M.

The electrical conductivity of milk for the detection of subclinical mastitis in cows : comparison of various methods of handling conductivity data with the use of cell counts and bacteriological examination.

Br. Vet. J., 1978, **134** : 308-314

[60] PURI B.R., PARKASH S.

Electrical conductivity of milk.

Indian J. Dairy Sci., 1963, **16** : 47-50

[61] PYÖRÄLÄ S.

Indicators of inflammation in the diagnosis of mastitis.

Vet. Res., 2003, **34** : 565-578

[62] RADOSTITS O.M., GAY C.C., HINCHCLIFF K.W.

Veterinary Medicine, 10e édition, 2006, Part 1, Chapter 15, p 686

[63] RIVAS A.L., QUIMBY F.W., BLUE J., COKSAYGAN O.

Longitudinal evaluation of bovine mammary gland health status by somatic cell counting, flow cytometry, and cytology.

J. Vet. Diagn. Invest., 2001, **13** : 399-407

[64] RUEGG P.L.

Premiums, production and pails of discarded milk how much money does mastitis cost you?
Resources Milk Money, 2005, **3** : 50-56

[65] RUEGG P.L., REINEMANN D.J.

Milk quality and mastitis tests.
The Bovine Practitioner, 2002, **36 (1)** : 41-54

[66] SARGEANT J. M., LESLIE K. E., SHIRLEY J. E., PULKRABEK B. J., LIM G. H.

Sensitivity and Specificity of somatic cell count and california mastitis test for identifying intramammary infection in early lactation.
J. Dairy Sci., 2001, **84** : 2018-2024

[67] SCHUKKEN Y. H., WILSON D. J., WELCOME F., GARRISON-TIKOFSKY L., GONZALEZ R. N.

Monitoring udder health and milk quality using somatic cell counts.
Vet. Res., 2003, **34** : 579-596

[68] SEEGER H., FOURICHON C., BAREILLE N.

Santé du troupeau laitier et systèmes de production : Orientations de recherche pour la maîtrise des mammites.
Commission Bovine, 24 et 25 octobre 2000 : 39-44

[69] SEGUYA A.G., MANSELL P.D.

An evaluation of a hand-held electrical resistance meter for the diagnosis of bovine subclinical mastitis in late lactation under Australian conditions.
Aus. Vet. J., 2000, **78 (9)** : 608-611

[70] SERIEYS F.

Interprétation des concentrations cellulaires du lait individuel de vache pour le diagnostic de l'état d'infection mammaire.
Ann. Rech. Vét., 1985 ; **16** : 263-269

[71] SHELDRAKE R.F., HOARE R.J.T.

The detection of mastitis in individual quarters using electrical conductivity or smatic cell concentration.
New Zealand Veterinary Journal, 1981, **29** : 211-213

[72] SHELDRAKE R.F., HOARE R.J.T., McGREGOR G.D.

Lactation stage, parity, and infection affecting somatic cells, electrical conductivity, and serum albumin in milk.
J. Dairy Sci., 1983, **66** : 542-547

[73] SHELDRAKE R.F., McGREGOR G.D., HOARE R.J.T.

Somatic cell count, electrical conductivity, and serum albumin concentration for detecting bovine mastitis.
J. Dairy Sci., 1983, **66** : 548-555

[74] SHOOK G., SCHUTZ M.M.

Selection on somatic cell score to improve resistance to mastitis in the United States.
J. Dairy Sci., 1994 ; **77** : 648-658

[75] Site internet du Contrôle Laitier

(page consulté le 27 mai 2009)

Adresse URL : <http://www.france-contrôle-laitier.fr/>

[76] Site internet de la société Delaval®

(page consultée le 8 mars 2008)

Adresse URL : <http://fr.delaval.nl/NR/rdonlyres/3A1427CF-79E9-42C5-8265-8127B0986566/0/movie.jpg>

[77] Site internet de la société Dramiński®

(page consultée le 8 mars 2008)

Adresse URL :

http://www.draminski.es/var/corporate/storage/images/products/cattle/draminski_4qmast_wykrywacz_mastitis_z_odczytem_4_cwiartek/1060-38-pol-PL/draminski_4qmast_wykrywacz_mastitis_z_odczytem_4_cwiartek.jpg

[78] Site internet de la société Dramiński®

(page consultée le 4 mai 2009)

Adresse URL : http://www.draminski.fr/products/cattle/draminski_wykrywacz_mastitis

[79] Site internet de la société IfU Diagnostic

(page consultée le 15 septembre 2009)

Adresse URL : <http://www.ifu-diagnostic.de/produkte.html>

[80] Site internet de la société Kitvia®

(page consultée le 8 mars 2008)

Adresse URL : <http://www.kitvia.com/images/masdtec.jpg>

[81] Site internet de la société QC- Supply

(page consultée le 15 février 2009)

Adresse URL : <http://www.qcsupply.com/Products/2573.aspx>

[82] van ASSELDONK M.A.P.M., HUIRNE R.B.M., DIJKHUIZEN A.A.

Quantifying characteristics of information-technology applications based on expert knowledge for detection of oestrus and mastitis in dairy cows.

Preventive Veterinary Medicine, 1998, **36** : 273-286

[83] WOOLFORD M.W., WILLIAMSON J.H., HENDERSON H.V.

Changes in electrical conductivity and somatic cell count between milk fractions from quarters subclinically infected with particular mastitis pathogens.

J. Dairy Res., 1998, **65** (2) : 187-198

-Annexes-

Annexe 1 : Publicités disponibles sur internet concernant différents conductimètres portables



Le détecteur de mammites subcliniques

« Aussi Bionature a conçu un détecteur portable, léger, d'un coût très modique, qui met dès

aujourd'hui cette technique à portée de tous les éleveurs.

Lorsqu'il y a une mammite subclinique, la concentration des sels dans le lait augmente et de ce fait la conductivité de ce lait augmente. L'appareil, en mesurant la conductivité, permet de détecter la mammite subclinique.

Lorsqu'un quartier présente une conductivité supérieure de plus de 15% à celles des autres quartiers, la probabilité de mammite subclinique est très forte et de plus en plus forte au fur et à mesure que cette différence s'élève. Des dizaines de milliers de mesures depuis plusieurs années nous ont permis de vérifier cette corrélation.

Cet appareil est fabriqué en France, une démonstration gratuite peut être réalisée en élevage sur demande de l'éleveur. Le détecteur bénéficie d'un service après-vente de proximité, d'une garantie d'une durée exceptionnelle de deux ans. »

[<http://www.bionatureanimale.fr/index.php?pageindx=1>] page consultée le 24 avril 2009

DRAMINSKI 4Q Mast - détecteur de mammite subclinique pour 1 quartier

« Détecter la mammite dans son stade initial et invisible. C'est un petit appareil portatif alimenté par une pile. Le principe de fonctionnement de l'appareil est basé sur les prises de mesure des variations de résistance électrique. Le lait tiré dans le quartier atteint d'un état inflammatoire subclinique se caractérise par une plus haute teneur en sel ce qui, en conséquence, provoque sa résistance électrique inférieure.

Par conséquent, il est possible de distinguer facilement, avant la traite, des quartiers malades et ceux en bon état ce qui permet de séparer le lait de qualité inférieure du lait convenable.

L'utilisation de ce petit appareil est très simple – il suffit de remplir un récipient test avec du lait d'un quartier examiné, appuyer sur le dispositif, mémoriser le résultat et répéter les pour chaque quartier. Cela permet d'examiner d'une manière facile et rapide l'état sanitaire de tous les quartiers à l'étable ou sur le pâturage. »



« Pourquoi choisir DRAMINSKI détecteur de Mammite 4Q Mast ?

- pour améliorer le rapport en détectant la mammite dans son stade initial et invisible
- parce que la détection précoce de l'infection permet un traitement rapide et évite le risque de dommage permanent à la mamelle
- pour surveiller votre troupeau pour assurer une production laitière de première qualité »

DRAMINSKI 4Q Mast - détecteur de mammite subclinique pour 4 quartiers

« Détecter la mammite dans son stade initial et invisible

C'est un petit appareil portable alimenté par une pile.

Le principe de fonctionnement de l'appareil est basé sur les prises de mesures de variations de résistance électrique. Le lait tiré dans le quartier atteint d'un état inflammatoire subclinique se caractérise par une plus haute teneur en sel ce qui, en conséquence, provoque sa résistance électrique inférieure.

Par conséquent, il est possible de distinguer facilement, avant la traite, des quartiers malades et ceux en bon état ce qui permet de séparer le lait de qualité inférieure du lait convenable.

L'utilisation de ce petit appareil est très simple – il suffit de remplir un récipient test avec du lait d'un quartier examiné, appuyer sur le dispositif, mémoriser le résultat et répéter les pour chaque quartier. Cela permet d'examiner d'une manière facile et rapide l'état sanitaire de tous les quartiers à l'étable ou sur le pâturage. »

« Pourquoi choisir DRAMINSKI détecteur de Mammite 4Q Mast ?

-pour améliorer le rapport en détectant la mammite dans son stade initial et invisible

-parce que la détection précoce de l'infection permet un traitement rapide et évite le risque de dommage permanent à la mamelle

- pour surveiller votre troupeau pour assurer une production laitière de première qualité

- il affiche les résultats de tous les quatre quartiers en même temps et les compare »

[http://www.draminski.fr/products/cattle/draminski_4qmast_wykrywacz_mastitis_z_odczytem_4_cwiartek] page consultée le 27 mai 2009

**M A T É R I E L S**

MAMMITES (DÉTECTEUR DE MAMMITE HANNA DIST 8)

PRINCIPE

- Durant les **épisodes inflammatoires** ou **mammites**, la glande mammaire subit des modifications qui entraînent des **variations de la concentration en ions**.
- Parce que la perméabilité des capillaires sanguins augmente et que l'imperméabilité des jonctions entre les cellules diminue, la concentration des ions dans le lait mammitéux change. La teneur en sodium et en chlore augmente, après l'endommagement des cellules, pour maintenir la pression osmotique, alors que la concentration en potassium et en lactose diminue.

Ainsi la C.E. (Conductibilité électrique) du lait peut être utilisée pour la détection des mammites.
(La C.E. mesurée quartier par quartier donne des résultats plus fiables pour la détection des mammites).

465.046734.05 Détecteur de mammite
Hanna Dist 8

Gamme E.C.	0,00 à 20,00 mS/cm.
Gamme T.D.S.	0,00 à 10,00 g/litre
Échelle température	0,0° C. à 60,0° C.
Précision E.C.	± 2 % pleine échelle
Précision T.D.S.	± 2 % pleine échelle
Précision température	± 0,5° C.
Étalonnage E.C./T.D.S.	Auto. en 1 point à 12,88 mS/cm.
Facteur conversion E.C./T.D.S.	Ajustable de 0,45 à 1,00
Correction de température	Automatique
Piles	4 x 1,5 V AA
Durée de vie des piles	2000 h en continu
Dimensions	120 x 53 x 81 mm.
Poids	225 g.



Ajouté en janvier 2005.MAT482G01

[<http://www.humeau.com/catalogue/FR/index.php?ref=MAT482>] page consultée le 20 janvier 2009

DETECTEUR DE MAMMITES

Réf. NA 459

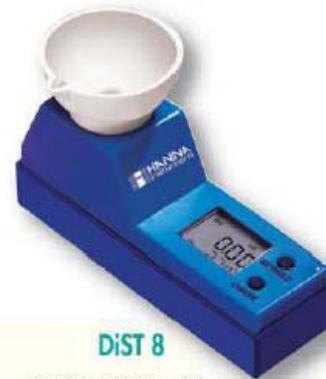
Un outil simple et pratique pour le dépistage de la mammite subclinique

DiST 8, idéal pour les mesures de détection des mammites

Si l'on constate sur un sujet une augmentation de la conductivité de son lait, il est fort probable qu'il développe une mammi

Compact et portable, DiST 8 est apprécié pour sa rapidité et facilité d'utilisation. Il mesure et affiche simultanément la conductivité et la température. Spécialement étudié pour les besoins de mesure en agriculture et traitement de l'eau, il est peu encombrant et muni d'un gobelet très pratique pour recevoir directement l'échantillon.

- Haute exactitude et fiabilité de mesure grâce au microprocesseur
- Affichage simultané de la conductivité et de la température
- Fonction HOLD pour figer une valeur pour une lecture ultérieure
- Très simple d'utilisation
- Robuste et étanche



SPECIFICATIONS :

		DiST 8
Gamme	EC (conductivité)	0.00 à 20.00 mS/cm
	TDS	0.00 à 10.00 g/l
	T°	0.0 à 60.0°C
Résolution	EC	0.01 mS/cm
	TDS	0.01 g/l
	T°	0.1°C
Exactitude	EC/TDS	± 2% pleine échelle
	T°	± 0.5°C
Etalonnage	EC/TDS	Auto. en 1 point à 12.88 mS/cm
Facteur conversion	EC/TDS	Ajustable de 0.45 à 1.00
Correction température		Automatique avec β ajustable de 0.0 à 2.4%/°C
Piles/Durée de vie	4 x 1.5V AA / Environ 2000 h d'utilisation continue	Auto-extinction après 8 minutes de non-utilisation
Dimensions/Poids		120 x 53 x 81 mm / 205 g

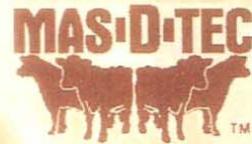
Solution d'étalonnage boîte de 25 HI70030P

Réf. NA 516

MAS-D-TEC

DEPISTAGE DES MAMMITES

AVANT TOUT SIGNE CLINIQUE



- Entretien réduit
- Manipulation simple
- Economies incontestables
- Résultat immédiat: 5 à 6 secondes
- Fonctionne avec simple pile de 9 volts
- Amorti par l'éleveur en très peu de temps quelle que soit l'importance du cheptel

Réf: 2501-DMD19

COMMENT FONCTIONNE LE MAS-D-TEC ?

Après avoir éliminé les premiers jets, placer l'instrument sous le trayon et actionner celui-ci de façon à laisser s'écouler 2 à 3 millilitres de lait (1 ou 2 jets) à l'intérieur du MAS-D-TEC.

Appuyer sur le bouton dans les 3 secondes suivant l'écoulement et lire le résultat:

Barre lumineuse dans la zone blanche: aucun problème
Barre lumineuse dans la zone rouge: présence de mammite

KITVIA 5 zone Perbost 31800 LABARTHE INARD

Tel : 05.61.88.88.54 Fax : 05.61.88.88.55



[<http://www.kitvia.com/docs/docmasdtec.pdf>] page consultée le 29 mai 2009



DEPISTAGE DES MAMMITES AVANT TOUT SIGNE CLINIQUE



Le principe d'utilisation du **MAS-D-TEC** repose sur la mesure de conductivité électrique dans un échantillon de lait de faible volume recueilli directement au pis de la vache. La conductivité du lait permet ainsi de détecter une mammite bien avant l'apparition de tout signe clinique et d'éliminer le risque de production de lait de qualité douteuse.

MAS-D-TEC est conçu de telle façon que l'échantillon de lait précédent est purgé par l'introduction d'un nouvel échantillon. Il n'est donc **pas nécessaire de nettoyer l'appareil entre chaque prélèvement**, mais seulement rincer à l'eau entre chaque traite.

Aux Etats-Unis, où le **MAS-D-TEC** a été mis au point, une laiterie moyenne de 120 à 150 vaches perd environ l'équivalent de 34 300 Euros par an pour cause de mammites. L'investissement d'un ou plusieurs **MAS-D-TEC** est donc **immédiatement et incontestablement rentabilisé**.

Plusieurs milliers de **MAS-D-TEC** sont utilisés de par le monde, plusieurs centaines en Europe; or, les utilisateurs de **MAS-D-TEC** sont souvent confrontés à des résultats non équivalents à ceux des contrôles exécutés dans certains laboratoires laitiers importants.

En effet, alors que **MAS-D-TEC** mesure les cellules par conductivité, la plupart des laboratoires à gros débit utilisent des appareils automatiques par mesure d'impédance pour des raisons de volumes d'échantillons à traiter importants. Pourtant, par la technique d'impédance, un nombre de débris de cellules mortes ou de taille équivalentes à celles des cellules à mammites peuvent être comptées, ainsi, souvent la **quantité de cellules trouvées est nettement supérieure à ce que l'éleveur trouve avec MAS-D-TEC**, et ce malgré qu'il fasse des efforts importants pour éliminer le lait de qualité douteuse.

Dans ce cas, le seul arbitrage possible est celui d'un laboratoire indépendant comptant les cellules sous un microscope.

Dans la grande majorité des cas, ce comptage au microscope prouve que le résultat trouvé par la **technique de conductivité est nettement plus spécifique de la Mammite** que celui trouvé avec les compteurs par impédance.

LECTURE ET INTERPRETATION:

- 0 à 1: Quantité de cellules très faible, aucun problème
- 1 à 4: Valeurs acceptables
- 5 et Plus: Mammite subclinique



[<http://www.kitvia.com/docs/docmasdtec.pdf>] page consultée le 29 mai 2009

TROP DE CELLULES ? DES MAMMITES ?

Ne passez pas à côté de la solution !

- 1 Dépistez précocement
- 2 Soulagez
- 3 Gagnez en productivité

DÉTECTER

Facile d'utilisation, le **Mas-d-tec** permet de détecter rapidement les mammites subcliniques



PRÉVENIR ET AGIR

100% naturelle, la lotion **Udder Comfort** apaise et adoucit. Hygiène et entretien favorisent la pleine santé des mamelles.



**N'ATTENDEZ PAS 1 JOUR DE PLUS !
TESTEZ LA SOLUTION GLOBALE KITVIA**



KITVIA

16, zone Perbost – 31800 LABARTHE INARD
Tél. : 33 (0)5 61 88 88 54
www.kitvia.com

[site internet de KITVIA] page consultée le 20 janvier 2009

Annexe 2 : Critères de jugement de l'efficacité de détection des mammites par la conductivité électrique du lait

Test de référence	Mammite Clinique	Mammite Subclinique	Seuils	Appareil
Clinique	Oui			Meta analyse
CCS		Oui		Meta analyse
Culture B.		Oui		Meta analyse
Culture B.		Oui	CCS>100 000	
CMT ou CCS				Meta analyse
Culture B.				Meta analyse
Culture B. et CCS				Meta analyse
			Absolu + Relatif	
	Oui			
		Oui		
				Portable
CMT			Fabricant	MastOTest 2.0
			Fabricant	MMS-3000
			Fabricant	Draminski
			Fabricant	Milk-Checker
Culture B.		Oui	Diode=4	Portable
				5
				6
				7
				8
			$\Delta = 1$	
			$\Delta = 2$	
			$\Delta = 3$	
Culture B. et CCS>500 000		Oui	Fabricant	Portable AHI Plastic Moulding Co, Hamilton
Culture B.			Fabricant	Portable
Culture B.	Oui (S uberis)		$\Delta > 10\%$	Portable Milk Checker
		Oui(S uberis)		
	Oui (S aureus)			
Culture B.			Fabricant	MAS-D-TEC
Culture B.			$\Delta > 11$ à 18%	En ligne
			$\Delta > 14$ à 21%	

Valeurs absolues (relatives)				Référence
Se	Sp	VPP	VPN	
68	82	58	82	[29]
68	88	72	85	
61	66	55	70	
35,6	95,1			[61]
57	94			[48]
75	95			
60	91			
57 (68)	91 (96)			
79	96			
34 à 95.0	71 à 100			[22]
11 à 100	0 à 99			
73.5 (40.3)	37.7 (88.6)	43 (69,1)	69,1 (70,7)	[5]
17,6 (38)	98,6 (92,6)	81,2 (66,7)	77,1 (79,3)	
41,7	94,7	71,4	83,7	
72,8 (63,8)	53,4 (84,5)	36,6 (60)	84,2 (86,5)	
87	30%	24	90	[47]
74	53	29	89	
55	69	32	86	
43	83	39	85	
30	89	41	83	
81	26	22	85	
53	77	37	87	
30	90	44	84	
90,6	67,2			[9]
35	65			[58]
92				[45]
33				
88				
100	43.3			[26]
71	26	12	86	[6]
71	52	17	93	

Test de référence	Mammite Clinique	Mammite Subclinique	Seuils	Appareil
Culture B.	Oui		Moyenne des 20	En ligne
		Oui	valeurs les plus élevées	
	Oui		Ecart type maximal de la conductivité	
		Oui		
	Oui		Rapport entre les quartiers	
		Oui		
	Oui		Rapport des valeurs des	
		Oui	écarts types entre les quartiers	
	Oui		Combinaison des 4 précédents	
		Oui		
CCS>200 000		Oui	$\Delta > 10\%$	En ligne
			$\Delta > 15\%$	idem
CCS>400 000		Oui	$\Delta > 10\%$	En ligne
			$\Delta > 15\%$	idem
Bactério, CCS et clinique	Oui	Oui	Déviations de certains paramètres par rapport à ce qui était prévisible en se basant sur les valeurs précédentes	En ligne
	Oui			En ligne
		Oui		
CCS>100 000 et antibio reçu			Groupe A	En ligne
			Groupe B	
CCS>400 000 et antibio reçu			Groupe A	
			Groupe B	
Culture B. et CCS	Oui	Oui		En ligne
Culture B.			5,6 mS/cm	En ligne
Culture B.			6 et 6.8 mS/cm	AHI Mastitis Detector
Culture B. et CCS		Oui		En ligne
Culture B. et CCS>500 000 ou CCS>1 000 000		Oui		En ligne
CCS>200 000				
Culture B. et CCS>500 000	Oui		$\Delta > 15-20\%$	En ligne
		Oui	$\Delta > 10-20\%$	

Valeurs absolues (relatives)				Référence
Se	Sp	VPP	VPN	
17,9	91,5			[53]
15,8	91,5			
16,2	98			
2,8	98			
46,2	92,3			
15,9	92,3			
32,1	97			
3,6	97			
47,9	91,9			
19,4	91,9			
0,46	87	45	87	[4]
40	92	55	87	
54	85	33	93	
51	91	45	93	
100	92			[13]
100	90			
100	88			
66	67			
73	87			[81]
58	82			
79,3	61,4	53,6		[7]
84,2	51,1	48,5		
80,8	78,3	20,9		
78,6	74,9	18,8		
75	90			[50]
15,7	91	63,6	52	[2]
50	76	10	96,5	[71]
39	91	69	75	
57	71	39,5	83	
55	90			[49]
25	99	35	99	[37]
		60	87	
100	96	75,7	100	[40]
53	96	63,6	94,1	

Test de référence	Mammite Clinique	Mammite Subclinique	Seuils	Appareil
Culture B.			5600µmho	
			5500 µmho	
			Combinaison absolu/relatif	
			Combinaison absolu/relatif	
WMT			Rapport >1.2	En ligne
Culture B.		Oui	56.5mM	En ligne
			Rapport >1.186	
Culture B.		Oui	56.5mM	En ligne
			Rapport >1.159	
CCS>500 000	Oui		IC 95%	En ligne
		Oui		
	Oui		IC 99%	
		Oui		
	Oui		IC 99,9%	
		Oui		
CCS>500 000	Oui		IC 95%	En ligne
		Oui		
	Oui		IC 99%	
		Oui		
	Oui		IC 99,9%	
		Oui		
Antibio reçu			Groupe 1	En ligne
Antibio + CCS>100 000				
Antibio + CCS>400 000				
Antibio reçu			Groupe 2	
Antibio + CCS>100 000				
Antibio + CCS>400 000				
Culture B.		S. aureus	7 000µS ou Ratio ≥ 1.15	?
		S. uberis		
		SCN		

Valeurs absolues (relatives)				Référence
Se	Sp	VPP	VPN	
40,2 (66)	93,5 (91,5)	90,6 (88,6)	71,5 (73)	[20]
96,2 (81,1)	91 (97,6)	91,4 (97,1)	96 (83,8)	
71,7	90,4	88,2	76,2	
98,1	91,4	91,9	98	
57,3	93,2	89,4	68,6	[25]
93,3	100	100	93,7	[59]
53,3	100	100	68,2	
80	100	100	83,3	
93,3	100	100	93,7	
100 (91,9)	100 (100)	100 (100)	100 (80)	[39]
100	77,8	71,4	100	
100	66,7	62,5	100	
96	95,3			[11]
100				[12]
90	98,2			
76				
65	99,4			
	57			
50		96		[12]
	76			
48		98,8		
	48			
37		99,4		
	24			
81,1	94			[8]
80,1	77,5			
81,2	89,1			
92,9	93,9			
83,2	75,8			
83,9	88,1			
40 à 100				[82]
40 à 80				
0 à 60				
	93 à 99			

Critères de jugement de l'efficacité de détection des mammites par les comptages cellulaires

Tests de référence	M clinique	M subclinique	Seuils
Bactério			>250 000
Bactério			>500 000
Bactério		Oui	Valeur absolue > 1 020 000
			Valeur différentielle rapport >1.48
Innoculation S. aureus		Oui	>500 000
Bactério			>100 000
			>250 000
			>500 000
Bactério			
Bactério			>200 000
		prévalence de 40%	>200 000
		Prévalence de 5%	
		Prévalence de 40%	>225 000
		Prévalence de 5%	
		prévalence de 40%	>250 000
		Prévalence de 5%	
Bactério			>200 000
Bactério			>200-250 000
Bactério		S. aureus	>500 000
		S. ubéris	
		SCN	

Se	SP	VPP	VPN	Références
36.8%	93.7%	76.4%	72.7%	[2]
66.0%	81.0%	16.0%	98.0%	[71]
88.0%	74.0%	63.0%	93.0%	
58.0%	88.0%	61.0%	86.0%	
86.7%	100.0%	100.0%	88.2%	[59]
93.3%	100.0%	100.0%	93.7%	
66.7%	83.3%	92.3%	45.5%	[63]
66.1 à 98.6%	41.3 à 4.4%			[66]
43.1 à 91.8%	21.3 à 74.5%			
28.4 à 76.7%	43.2 à 89.1%			
47.0%	45.0%			[58]
73 à 89.0%	75 à 85.0%			[65]
72.6%	85.5%	77.0%	82.0%	
		21.0%	98.0%	
63.0%	93.2%	86.0%	79.0%	
		33.0%	98.0%	
54.7%	96.2%	91.0%	79.0%	
		43.0%	97.0%	
73 à 89.0%	75 à 85.0%			[61]
75.0%	90.0%			[67]
90 à 100%				[82]
80 à 90%				
40 à 70%				
	91 à 96%			

Critères de jugement de l'efficacité de détection des mammites par le California Mastitis Test

Tests de référence	M clinique	M subclinique	Seuils
Bactério			>léger
Bactério			>0
			>1
			>2
Bactério		Oui	>0
			≥1
			>0
Bactério		Oui	>0
			≥1
			>0
Bactério		Oui	>0
			>1
			>0 (4ième jour après vélage)
Bactério pathogènes majeurs		Oui	>0
Bactério pathogènes mineurs			

Se	SP	VPP	VPN	Références
63.9%	96.0%	91.1%	80.5%	[2]
38.2 à 66.7%	54.4 à 61.2%			[66]
17.4 à 39.7%	82.4 à 88.9%			
4.6 à 23.1%	95.9 à 97.6%			
92.0%	41.0%	46.0%	91.0%	[38]
72.0%	64.0%	52.0%	81.0%	
66.7%	54.8%			
56.5%	56.1%			
92.0%	41.0%	46.0%	91.0%	[65]
72.0%	64.0%	52.0%	81.0%	
66.7%	54.8%			
56.5%	56.1%			
68.8%	71.5%	21.1%	95.4%	[14]
55.5%	86.6%	31.4%	94.6%	
82.4%	80.6%	42.4%	96.3%	
66.7%				[61]
49.5%				

Annexe 3 : Intégralité des résultats des examens cliniques

Vache	Date	Quartier	Examen clinique		
			Palpation de la mammelle	Noeud lymphatique retro-mammaire	Examen sur bol à fond noir
263	10/03/2008	AG	N	N	N
		AD	N	N	N
		PG	N	N	N
		PD	N	N	N
	17/03/2008	AG	N	N	N
		AD	N	N	N
		PG	N	N	N
		PD	N	N	N
135	10/03/2008	AG	N	N	N
		AD	N	N	N
		PG	Induration Légère	N	N
		PD	N	N	N
	17/03/2008	AG	N	N	N
		AD	N	N	N
		PG	Induration Légère	N	N
		PD	N	N	N
	25/03/2008	AG	N	N	G
		AD	N	N	N
		PG	Induration Légère	N	G
		PD	N	N	N
3768	10/03/2008	AG	N	N	N
		AD	N	N	N
		PG	N	N	N
		PD	N	N	N
	17/03/2008	AG	N	N	N
		AD	N	N	N
		PG	N	N	N
		PD	N	N	N
6451	10/03/2008	AG	N	Réaction légère	N
		AD	N	Réaction légère	N
		PG	N	Réaction légère	N
		PD	N	N	N
	17/03/2008	AG	N	N	N
		AD	N	N	N
		PG	N	N	N
		PD	N	N	N
	25/03/2008	AG	N	N	N
		AD	N	N	N
		PG	N	N	N

		PD	N	N	N	
3960	17/03/2008	AG	N	N	N	
		AD	N	N	N	
		PG	N	N	N	
		PD	N	N	N	
	25/03/2008	AG	N	N	N	
		AD	N	N	N	
		PG	N	N	N	
		PD	N	N	N	
	31/03/2008	AG	N	N	N	
		AD	N	N	N	
		PG	Induration légère	N	N	
		PD	Induration légère	N	N	
6418	25/03/2008	AG	N	N	N	
		AD	N	N	N	
		PG	N	N	N	
		PD	N	N	N	
	05/05/2008	AG	N	N	N	
		AD	N	N	N	
		PG	N	N	N	
		PD	N	N	N	
	14/05/2008	AG	N	N	N	
		AD	N	N	N	
		PG	N	N	N	
		PD	N	N	N	
	20/05/2008	AG	N	N	N	
		AD	N	N	N	
		PG	N	N	N	
		PD	N	N	N	
	21/05/2008	AG	N	N	N	
		AD	N	N	N	
		PG	N	N	N	
		PD	N	N	N	
1165	31/03/2008	AG	Induration légère	N	G	
		AD	N	N	N	
		PG	N	N	N	
		PD	N	N	N	
5566	31/03/2008	AG	N	N	N	
		AD	N	N	N	
		PG	N	N	N	
		PD	N	N	N	

2847	01/04/2008	AG	N	N	N	
		AD	N	N	N	
		PG	N	N	N	
		PD	N	N	N	
4529	01/04/2008	AG	N	N	N	
		AD	N	N	N	
		PG	Induration Légère	N	G	
		PD	N	N	N	
2007	29/04/2008	AG	Œdème	N	G	
		AD	Œdème	N	N	
		PG	Œdème	N	N	
		PD	Œdème	N	N	
	05/05/2008	AG	Œdème	N	G	
		AD	Œdème	N	N	
		PG	Œdème	N	N	
		PD	N	N	N	
	14/05/2008	AG	N	N	N	
		AD	N	N	N	
		PG	N	N	N	
		PD	N	N	N	
8813	29/04/2008	AG	N	N	N	
		AD	N	N	N	
		PG	N	N	N	
		PD	N	N	N	
6331	29/04/2008	AG	Induration sévère	N	N	
		AD	Induration sévère	N	N	
		PG	N	N	N	
		PD	N	N	N	
	14/05/2008	AG	N	N	G	
		AD	N	N	G	
		PG	N	N	N	
		PD	N	N	N	
3268	05/05/2008	AG	N	N	N	
		AD	N	N	N	
		PG	N	N	N	
		PD	N	N	N	
	14/05/2008	AG	N	N	N	
		AD	N	N	N	
		PG	N	N	N	
		PD	N	N	N	
1476	05/05/2008	AG	N	N	N	
		AD	Induration légère	N	N	
		PG	N	N	N	

		PD	N	N	N	
	14/05/2008	AG	N	N	N	
		AD	N	N	N	
		PG	N	N	N	
		PD	N	N	N	
4451	05/05/2008	AG	N	N	N	
		AD	Induration légère	N	N	
		PG	N	N	N	
		PD	N	N	N	
6380	06/05/2008	AG	N	N	N	
		AD	N	N	N	
		PG	N	N	N	
		PD	N	N	N	
	14/05/2008	AG	N	N	N	
		AD	N	Hypertrophie légère	N	
		PG	N	N	N	
		PD	N	Hypertrophie légère	N	
	21/05/2008	AG	N	N	N	
		AD	N	N	N	
		PG	N	N	N	
		PD	N	N	N	
4063	06/05/2008	AG	N	N	N	
		AD	N	N	N	
		PG	N	N	N	
		PD	N	N	N	
	14/05/2008	AG	N	N	N	
		AD	N	N	N	
		PG	N	N	N	
		PD	N	N	N	
	21/05/2008	AG	N	N	N	
		AD	N	N	N	
		PG	N	N	N	
		PD	N	N	N	
8893	06/05/2008	AG	N	N	N	
		AD	N	N	N	
		PG	N	N	N	
		PD	N	N	N	
334	14/05/2008	AG	Induration Sévère	Hypertrophie	Pus	
		AD	N	N	N	
		PG	N	N	N	
		PD	N	N	N	
2350	20/05/2008	AG	N	N	N	

		AD	N	N	N	
		PG	N	N	N	
		PD	N	N	G	
	21/05/2008	AG	N	N	N	
		AD	N	N	N	
		PG	N	N	N	
		PD	N	N	G	
3479	20/05/2008	AG	N	N	N	
		AD	N	N	N	
		PG	N	N	N	
		PD	N	N	N	

AG = Antérieur Gauche, AD = Antérieur Droit, PG = Postérieur Gauche, PD = Postérieur Droit, N = Normal

Annexe n°4 : Motif d'hospitalisation des vaches utilisées lors de l'étude

Vache	Motif d'hospitalisation
263	Dilatation-torsion caillette à droite
135	Dilatation caillette à gauche
3768	Dilatation caillette à gauche
6451	Péricardite
3960	Plaie vaginale purulente
6418	Suspicion d'occlusion
1165	Empyème pleural à droite
5566	Amaigrissement après vêlage
2847	Tremblements spastiques des postérieurs
4529	Dilatation caillette à gauche
2007	Dilatation caillette à gauche
8813	Non renseigné
6331	Abcès de paroi suite à césarienne
3268	Acétonémie, météorisation
1476	Anorexie
4451	Dilatation caillette à gauche
6380	Dilatation caillette à gauche
4063	Abcès vaginal
8893	Syndrome queue de cheval
334	Métrite suite à embryotomie
2350	Non renseigné
3479	Non renseigné

Toulouse, 2009

NOM : JACQUINET

Prénom : Sébastien

TITRE : Evaluation du dépistage des mammites par la conductivité électrique du lait

RESUME : Les mammites représentent une maladie coûteuse en élevage laitier ; leur dépistage efficace est l'une des clefs du contrôle. Plusieurs méthodes existent au pied de l'animal : comptages cellulaires individuels (CCI), CMT, conductivité électrique du lait,... L'objectif de ce travail était d'évaluer, chez la vache laitière, 3 conductimètres portatifs en comparaison avec les CCI, le CMT et l'examen clinique. Les conductimètres utilisés s'avèrent, sur notre échantillon, plus performants pour détecter les quartiers sains que les quartiers infectés : en fonction de la marque, leur spécificité peut être bonne, mais leur sensibilité reste en général médiocre. Pour tenter de limiter les résultats erronés, des essais pourraient porter sur la standardisation, pour certains conductimètres, sur l'utilisation par quartier, sur la limitation des indications, et sur la validation de seuils. Les performances de ces conductimètres portatifs paraissent cependant inférieures à celles des CCI ou du CMT.

MOTS-CLES : Mammites, dépistage, conductivité, lait

ENGLISH TITLE : Assessment of mastitis detection by electrical conductivity of milk

ABSTRACT : Mastitis is an expensive disease in dairy stockbreeding ; efficient detection of mastitis is one of the keys to control them. Several methods on animal exist : individual somatic cells count (CCI), CMT, electrical conductivity of milk,... The purpose of this work was to evaluate, for dairy cows, three hand-held conductimeters, and compare them with CCI, CMT and clinical examination. On our sample population the conductivity meters proved to be more accurate at detecting healthy quarters than infected quarters : depending on brand, their specificity can be good but their sensitivity remains generally mediocre. In order to limit false detections, work could be conducted to define a standard on use on quarters, on limitation of indication and on threshold validation. Performances of these hand-held conductimeters appear to be lower than the performances of CCI or CMT.

KEYWORDS : Mastitis, detection, conductivity, milk