

UNIVERSITE DE NANTES  
UNITE DE FORMATION ET DE RECHERCHE D'ODONTOLOGIE

Année : 2010

Thèse N :

**THESE DE DOCTORAT**

Ecole Doctorale : Biologie - Santé  
Spécialité : Recherche clinique, Innovation technologique, Santé Publique  
Discipline : Odontologie

**ETUDE DE LA FLUXMETRIE LASER DOPPLER DANS  
L'EVALUATION DE LA VITALITE PULPAIRE EN  
ODONTOLOGIE**

Thèse présentée et soutenue publiquement par

**Elisabeth ROY**

Le 28 Janvier 2010 devant le jury ci-dessous :

Mme le Pr Marie-Christine Alric-Goldsmith : présidente, rapporteur

M. le Pr Louis-Frédéric Jacquelin : rapporteur

Mme le Dr Sylvie Dajean-Trutaud : examinatrice

M. le Dr Yves Delbos : examinateur

M. le Pr Alain Jean : directeur

Mme le Pr Brigitte Alliot-Licht : co-directrice

## TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION .....	5
PREMIERE PARTIE. SITUATION DU SUJET : GENERALITES SUR LA FLUXMETRIE LASER DOPPLER ET PROBLEMATIQUE DU DIAGNOSTIC DE LA VITALITE PULPAIRE.....	8
1 FLUXMETRIE LASER DOPPLER : PRINCIPES PHYSIQUES ET APPLICATIONS MEDICALES	9
1.1 LA LUMIERE LASER .....	9
1.1.1 HISTORIQUE .....	9
1.1.2 RAPPELS PHYSIQUES .....	10
1.1.2.1 Théorie quantique de Planck .....	10
1.1.2.2 Théorie des interactions d'Einstein .....	11
1.1.3 FONCTIONNEMENT D'UN FAISCEAU LASER.....	12
1.1.3.1 Le milieu actif .....	13
1.1.3.2 Le phénomène de pompage ou inversion de population .....	14
1.1.3.3 La cavité amplificatrice .....	14
1.1.4 DIFFERENTS TYPES DE LASER .....	15
1.1.4.1 Les lasers solides .....	15
1.1.4.1.1 Les lasers à cristaux .....	15
1.1.4.1.2 Les lasers à verres dopés .....	15
1.1.4.2 Les lasers à gaz.....	15
1.1.4.2.1 Le laser hélium-néon.....	16
1.1.4.2.2 Le laser à CO <sub>2</sub> .....	16
1.1.4.3 Les lasers à semi-conducteurs .....	16
1.1.5 PROPRIETES DE LA LUMIERE LASER .....	17
1.1.5.1 La cohérence spatio-temporelle .....	17
1.1.5.2 La monochromaticité.....	17
1.1.5.3 La directivité .....	17
1.1.5.4 L'énergie ou luminance.....	17
1.1.6 INTERACTION ENTRE UN FAISCEAU DE LUMIERE LASER ET LA MATIERE.....	18
1.2 L'EFFET DOPPLER .....	19
1.2.1 PRINCIPE DE L'EFFET DOPPLER.....	19
1.2.2 VELOCIMETRIE DOPPLER A EMISSION CONTINUE.....	20
1.2.3 VELOCIMETRIE DOPPLER A EMISSION PULSEE .....	21
1.3 LA FLUXMETRIE LASER DOPPLER .....	22
1.3.1 BASES DE LA FLUXMETRIE LASER DOPPLER .....	22
1.3.1.1 Généralités.....	22
1.3.1.2 Calibrage .....	24
1.3.1.3 Standardisation.....	25
1.3.2 EXEMPLES D'APPLICATIONS MEDICALES DE LA FLUXMETRIE LASER DOPPLER .....	26
1.3.2.1 La fluxmétrie laser Doppler en dermatologie et en chirurgie plastique .....	26
1.3.2.2 La fluxmétrie laser Doppler en angiologie et en chirurgie vasculaire .....	26
1.3.2.3 La fluxmétrie laser Doppler en ophtalmologie .....	27
1.3.2.4 La fluxmétrie laser Doppler en neurochirurgie.....	27
2. PROBLEMATIQUE DU DIAGNOSTIC DE LA VITALITE PULPAIRE .....	28
2.1 PHYSIOPATHOLOGIE DES REACTIONS PULPO-DENTINAIRES.....	28
2.1.1 REACTIONS DENTINAIRES.....	29
2.1.1.1 La dentine sclérotique .....	29
2.1.1.2 La dentine réactionnelle .....	30
2.1.1.3 Les tractus morts .....	31
2.1.2 REACTIONS PULPAIRES.....	32
2.1.2.1 L'inflammation pulpaire ou la pulpite .....	32
2.1.2.2 La nécrose pulpaire .....	33
2.1.3 CONSEQUENCES SUR LE DIAGNOSTIC DE LA VITALITE PULPAIRE .....	34
2.2 MOYENS ACTUELS DE DIAGNOSTIC DE LA VITALITE PULPAIRE .....	35
2.2.1 L'ANAMNESE EN ODONTOLOGIE.....	35
2.2.2 L'EXAMEN CLINIQUE EN ODONTOLOGIE .....	36
2.2.3 LA DOULEUR DANS LE DIAGNOSTIC DE LA VITALITE PULPAIRE.....	37
2.2.4 L'OBSERVATION CLINIQUE DANS LE DIAGNOSTIC DE LA VITALITE PULPAIRE .....	39
2.2.5 LES TESTS DE SENSIBILITE PULPAIRE .....	40

2.2.5.1	Rappels sur l'innervation pulpaire.....	40
2.2.5.2	Tests thermiques.....	43
2.2.5.2.1	Test au froid.....	43
2.2.5.2.1.1	Protocole.....	43
2.2.5.2.1.2	Principe.....	43
2.2.5.2.1.3	Réponses.....	43
2.2.5.2.1.4	Limites.....	44
2.2.5.2.2	Test au chaud.....	45
2.2.5.2.2.1	Protocole.....	45
2.2.5.2.2.2	Principe.....	45
2.2.5.2.2.3	Réponses.....	45
2.2.5.2.2.4	Limites.....	46
2.2.5.3	Test électrique.....	46
2.2.5.3.1	Protocole.....	47
2.2.5.3.2	Principe.....	47
2.2.5.3.3	Réponses.....	47
2.2.5.3.4	Limites.....	48
2.2.6	<i>LES AUTRES TESTS</i> .....	49
2.2.6.1	Tests de percussion.....	49
2.2.6.2	Test de morsure.....	50
2.2.6.3	Test d'anesthésie.....	50
2.2.6.4	Tests de cavité.....	50
2.2.7	<i>L'EXAMEN RADIOGRAPHIQUE : APPORTS ET LIMITES</i> .....	51
2.3	INTERET DE L'ETUDE DE LA VASCULARISATION PULPAIRE DANS LE DIAGNOSTIC DE LA VITALITE PULPAIRE.....	52
2.3.1	<i>VASCULARISATION PULPAIRE</i> .....	52
2.3.1.1	Caractéristiques de la vascularisation pulpaire.....	53
2.3.1.2	Physiologie vasculaire.....	54
2.3.2	<i>METHODES EXPERIMENTALES DE DIAGNOSTIC DE LA VITALITE PULPAIRE BASEES SUR L'EXPLORATION DE LA VASCULARISATION PULPAIRE</i> .....	55
2.3.2.1	L'oxymétrie de pouls.....	56
2.3.2.2	La photopléthysmographie.....	56
2.3.2.3	La sonde de radiation au Xénon.....	56
	DEUXIEME PARTIE. ETUDES EXPERIMENTALES SUR L'EVALUATION DE LA VITALITE PULPAIRE PAR FLUXMETRIE LASER DOPPLER.....	58
1	ETAT DES CONNAISSANCES SUR LA FLUXMETRIE LASER DOPPLER DANS LE DIAGNOSTIC DE LA VITALITE PULPAIRE EN ODONTOLOGIE.....	59
1.1	ETUDES SUR DENTS SAINES ANESTHESIEES.....	60
1.2	TESTS DE FLUXMETRIE LASER DOPPLER SUR DENTS VITALES ET SUR DENTS NON VITALES.....	62
1.3	APPORT DE LA FLUXMETRIE LASER DOPPLER EN CHIRURGIE MAXILLO-FACIALE.....	65
1.4	ENREGISTREMENTS DES FLUX SANGUINS PULPAIRES DE DENTS TRAUMATISEES.....	66
2	MATERIELS ET METHODES.....	69
2.1	FLUXMETRE LASER DOPPLER.....	69
2.1.1	<i>DESCRIPTION</i> .....	69
2.1.2	<i>CALIBRAGE</i> .....	70
2.2	CONDITIONS D'ENREGISTREMENTS.....	73
2.3	PREPARATION DU PATIENT.....	73
2.4	CHAMP OPERATOIRE.....	74
2.5	FIXATION DE LA SONDE.....	74
2.6	ANALYSE DES DONNEES.....	76
3	MISE AU POINT DU PROTOCOLE.....	76
3.1	TEST PRELIMINAIRE.....	76
3.2	ETUDE DES VALEURS DE FLUX SANGUIN PULPAIRE DE DENTS VITALES.....	79
3.3	ETUDE DE LA REPRODUCTIBILITE DES VALEURS DE FLUX SANGUIN PULPAIRE.....	82
3.4	TESTS DE TEMPERATURE AMBIANTE.....	85
3.5	DISCUSSION.....	86
4	TESTS COMPARATIFS DE FLUXMETRIE LASER DOPPLER SUR DENTS OBTUREES ET SUR DENTS VITALES.....	91

4.1	ETUDE DE LA REPRODUCTIBILITE DES VALEURS ENREGISTREES SUR UNE MEME DENT NON VITALE .....	92
	4.1.1 <i>DENTS TESTEES</i> .....	92
	4.1.2 <i>RESULTATS</i> .....	93
4.2	COMPARAISON DES VALEURS ENREGISTREES EN FLUXMETRIE LASER DOPPLER SUR DES DENTS VITALES ET DES DENTS NON VITALES.....	96
	4.2.1 <i>ECHANTILLON</i> .....	96
	4.2.2 <i>RESULTATS</i> .....	96
4.3	ETUDE DES COURBES DE VITESSE DES HEMATIES ENREGISTREES SUR DES DENTS VITALES ET DES DENTS OBTUREES .....	98
	4.3.1 <i>ECHANTILLON</i> .....	98
	4.3.2 <i>RESULTATS</i> .....	98
4.4.	DISCUSSION.....	99
5	APPLICATION CLINIQUE DE LA FLUXMETRIE LASER DOPPLER POUR L'EVALUATION ..... DE LA VITALITE PULPAIRE DANS LE CAS PARTICULIER DES LUXATIONS DENTAIRES	101
5.1	RAPPELS SUR LES LUXATIONS DENTAIRES.....	102
	5.1.1 <i>CONSEQUENCES DES LUXATIONS DENTAIRES SUR LES TISSUS DE SOUTIEN DE LA DENT</i> .....	102
	5.1.2 <i>EXTRUSIONS</i> .....	104
	5.1.3 <i>LUXATIONS LATERALES</i> .....	105
	5.1.4 <i>SUBLUXATIONS</i> .....	107
5.2	ECHANTILLON .....	108
5.3	RESULTATS.....	112
5.4	DISCUSSION.....	115
	CONCLUSION.....	118
	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....	121
	TABLE DES ILLUSTRATIONS .....	131
	PUBLICATIONS EN RAPPORT AVEC LA THESE .....	134

# **INTRODUCTION**

Une des spécificités de l'odontologie réside dans la difficulté d'explorer directement ou indirectement la pulpe dentaire. Totalement incluse dans une cavité minéralisée inextensible, dont le volume se réduit avec l'âge, la pulpe supporte des conditions physiologiques défavorables. Ces particularités font qu'aucun examen fonctionnel direct de la pulpe n'est possible. Les difficultés de diagnostic et de pronostic de la vitalité pulpaire ainsi que du choix de la thérapeutique appropriée résultent de l'ignorance de l'état réel de la pulpe. Dans la majorité des cas, l'analyse des symptômes décrits par le patient, l'examen clinique et l'examen radiographique suffisent au diagnostic de la vitalité pulpaire et permettent de décider de la thérapeutique. Cependant, le diagnostic de la vitalité pulpaire n'est pas toujours aussi aisé. Pour établir le diagnostic, il est d'usage de compléter l'examen clinique par des tests de sensibilité, témoins de la réponse nerveuse de la pulpe à une stimulation. Ces tests ne peuvent pas réellement rendre compte de la vitalité de la pulpe. Seule une étude de la vascularisation de la pulpe dentaire permettrait de déterminer objectivement si la pulpe est conservable ou non.

Ces constatations ont incité les odontologistes à rechercher une méthode d'étude de la vascularisation pulpaire sensible, objective, reproductible et non invasive. La littérature rapporte les avancées de la fluxmétrie laser Doppler depuis la fin des années 1980. Cette technique s'est développée dans de nombreuses disciplines médicales, de la chirurgie plastique à l'angiologie, où elle permet une évaluation précise de la microcirculation sanguine. Le fluxmètre laser Doppler mesure le flux des cellules sanguines à l'intérieur d'un tissu sans provoquer la moindre altération de celui-ci. La fluxmétrie laser Doppler repose sur le principe de l'effet Doppler appliqué au rayonnement laser.

Dans la première partie de ce travail, consacrée aux généralités sur la fluxmétrie laser Doppler et à la problématique du diagnostic de la vitalité pulpaire, nous effectuerons des rappels sur les principes physiques de la lumière laser, de l'effet Doppler et de la fluxmétrie laser Doppler, dont nous évoquerons les principales applications médicales non odontologiques. Nous nous intéresserons à la problématique du diagnostic de la vitalité pulpaire en insistant sur les moyens diagnostiques actuels et sur leurs limites, puis nous verrons en quoi l'évaluation clinique de la vascularisation pourrait constituer un moyen efficace pour affirmer la présence d'un tissu pulpaire conservable.

Dans la deuxième partie de cette thèse, nous présenterons les études expérimentales sur l'évaluation de la vitalité pulpaire par fluxmétrie laser Doppler que nous avons menées au Pôle Odontologie du CHU de Nantes avec le fluxmètre laser Doppler Periflux 5000 (Perimed, Stockholm, Sweden). Nous réaliserons un état des lieux des connaissances sur la fluxmétrie

laser Doppler dans le diagnostic de la vitalité pulpaire avant d'exposer notre protocole opératoire. Nous donnerons les résultats des tests préliminaires qui nous ont permis d'évaluer le système Periflux 5000 en tant que moyen diagnostique de la vitalité pulpaire. Nous nous intéresserons à l'enregistrement des valeurs numériques du flux sanguin pulpaire et aux courbes de vitesse des hématies que la fluxmétrie laser Doppler permet aussi d'explorer. Enfin, une étude comparant les résultats des courbes de vitesse des hématies enregistrées par fluxmétrie laser Doppler à ceux des tests de sensibilité conventionnels sera détaillée dans le cas particulier des luxations dentaires. Les résultats de chacune des études expérimentales seront discutés.

**PREMIERE PARTIE.**

**SITUATION DU SUJET : GENERALITES**

**SUR LA FLUXMETRIE LASER**

**DOPPLER ET PROBLEMATIQUE DU**

**DIAGNOSTIC DE LA VITALITE**

**PULPAIRE**

# 1 FLUXMETRIE LASER DOPPLER : PRINCIPES PHYSIQUES ET APPLICATIONS MEDICALES

La fluxmétrie laser Doppler est décrite comme un outil diagnostique d'investigation non invasif qui permet de mesurer le flux sanguin d'un tissu (Oberg, 1990). Cette technique utilise l'effet Doppler appliqué au rayonnement laser. Il convient d'effectuer quelques rappels sur ces principes physiques avant d'en exposer les applications médicales.

## 1.1 LA LUMIERE LASER

Le terme de « LASER » est l'acronyme anglais de *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (Maiman, 1960), traduit en Français par *Amplification de Lumière par Emission Stimulée de Rayonnement*. Le laser peut être défini comme une source de rayonnements optiques cohérents, fréquemment incorporée dans un appareil émettant un faisceau de rayonnements monochromatiques, de longueur d'onde située dans un domaine pouvant aller de l'infra-rouge jusqu'à l'ultra-violet, en passant par le spectre visible (400-800nm). Ces rayonnements sont identiques par leurs phases. Les lasers sont utilisés dans des secteurs aussi variés que l'industrie, les arts et spectacles, le domaine médical, la recherche, l'enseignement ou la défense nationale (pour revue voir Bertollotti, 2004).

### 1.1.1 HISTORIQUE

- 1905 : Einstein définit l'émission photoélectrique par absorption.
- 1913 : modèle atomique de Bohr et définition de l'émission atomique.
- 1917 : Einstein met en évidence le phénomène de l'émission stimulée.
- 1950 : Kastler met au point la méthode du pompage optique.
- 1954 : Townes construit un émetteur de micro-ondes par émission stimulée qu'il appelle *maser*.
- 1958 : Townes et Scalow proposent que cette émission stimulée puisse être utilisée pour amplifier la lumière.
- 1960 : réalisation du premier laser pulsé à rubis par Maiman.

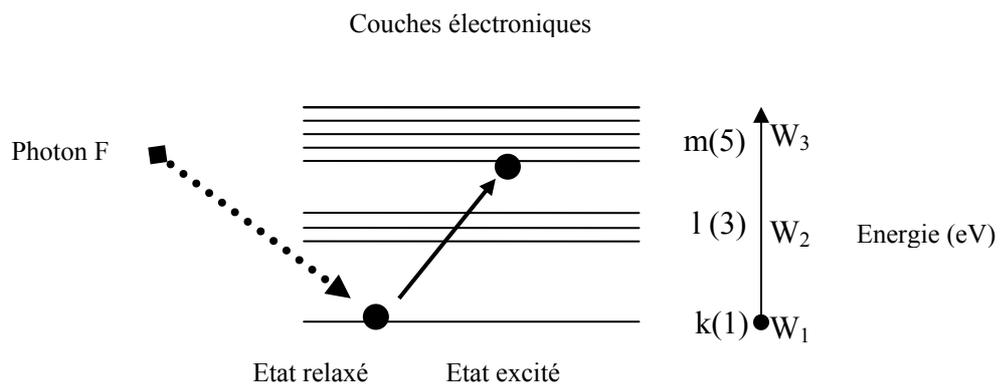
- 1961 : réalisation du premier laser à gaz par Javan (laser Hélium Néon) et du laser Nd : YAG (Neodim : Yttrium-Aluminium-Garnet) par Johnson.
- 1962 : réalisation du laser à Argon par l'équipe de Bennet.
- 1964 : réalisation du laser à CO<sub>2</sub> (dioxyde de carbone) par Patel.
- 1966 : premier laser à colorant réalisé dans le laboratoire IBM.
- 1967 : commercialisation du premier laser pour des applications médicales : laser CO<sub>2</sub> par American Optical.

Depuis, les recherches sur le laser et leurs applications se sont multipliées (Hecht, 2005).

## 1.1.2 RAPPELS PHYSIQUES

### 1.1.2.1 Théorie quantique de Planck

Les électrons des atomes peuvent posséder des énergies discrètes ( $W$ ) formant une suite discontinue, selon leur position par rapport au noyau. L'état fondamental est celui où  $W$  présente la plus petite valeur possible, soit  $W_1$ . Les énergies plus grandes,  $W_2$ ,  $W_3$ , correspondent à des états excités, résultant du choc avec un autre atome ou à l'absorption d'un rayonnement (Fig. 1) (Planck, 1922).



**Figure 1 : Absorption d'un rayonnement de fréquence  $F$  par un atome et dénomination des différentes couches et sous-couches atomiques (d'après Nozic, 2009).**

### 1.1.2.2 Théorie des interactions d'Einstein

L'émission de lumière a lieu lors du passage des atomes d'un état excité à un autre moins excité, ou directement à l'état fondamental. La fréquence du photon émis est donnée par la relation :

$$\nu = \frac{W' - W}{h}$$

$W'$  et  $W$  étant les valeurs initiales et finales de l'énergie sur les couches électroniques correspondantes et  $h$  la constante universelle de PLANCK :

$$h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$$

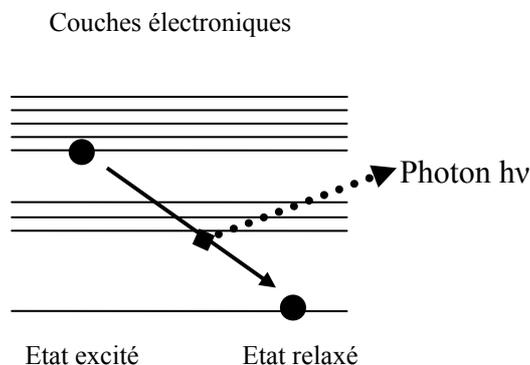
Si à la suite d'un apport externe d'énergie, un électron d'un atome se trouve dans un état excité, il va revenir sur son niveau fondamental en émettant une onde d'énergie  $h\nu$  telle que :

$$h\nu = \text{énergie de l'état excité} - \text{énergie de l'état fondamental}$$

Le retour à l'état fondamental peut être stimulé par le passage de l'électron d'une onde de même énergie  $h\nu$ , notamment lorsque les deux ondes émises sont en phase. Ce passage et l'émission du photon correspondant de fréquence  $\nu$  peuvent résulter de deux processus différents : l'émission spontanée et l'émission induite. Dans le premier cas, le photon est émis dans une direction quelconque (Fig. 2). L'instant d'émission est aléatoire. Sur un grand nombre  $N'$  d'atomes dans l'état  $W'$ , le nombre  $dN'$  de ceux qui retombent à l'état  $W$  pendant le temps  $dt$  est :

$$dN' = A W' W N' dt$$

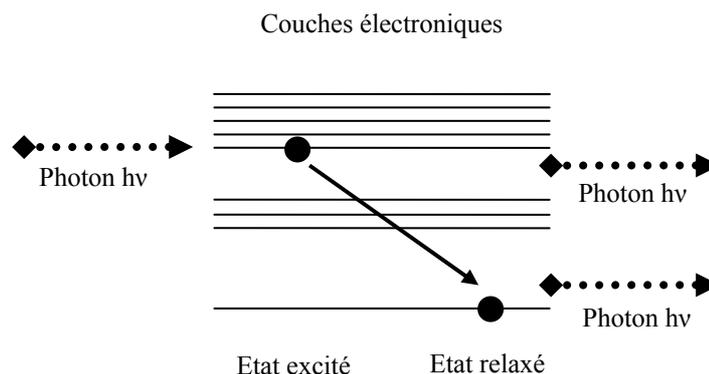
$A W' W$  étant la probabilité d'émission spontanée par unité de temps (Einstein, 1917 ; Einstein et Infeld, 1938).



**Figure 2 : Principe de désexcitation émissive spontanée d'un atome excité**

L'émission spontanée correspond donc à la lumière émise, par exemple, par une lampe à incandescence. Les photons ne possèdent aucune caractéristique commune : ni fréquence (lumière polychromatique), ni directivité (omnidirectionnelle), ni cohérence (pas d'interférence possible). Il s'agit de l'émission, plus ou moins isotrope, d'un photon d'un atome au cours d'une désexcitation de  $W'$  vers  $W$  (Hobbie et Roth, 2006).

Le second processus, l'émission induite, n'a lieu que si l'atome est soumis à un champ électromagnétique de même fréquence  $\nu$  que celle correspondant à la transition  $W \rightarrow W'$  ou  $W' \rightarrow W$ . La présence d'un tel champ provoque la désexcitation de l'atome de  $W'$  vers  $W$  et donc l'émission d'un photon qui présente une propriété remarquable : non seulement, sa fréquence est la même, mais surtout il est en phase avec le champ électromagnétique et dans la même direction (Fig. 3). Par conséquent, il est impossible de distinguer le photon induit du photon inducteur, ce qui réalise une amplification du signal initial (Paschotta, 2008).



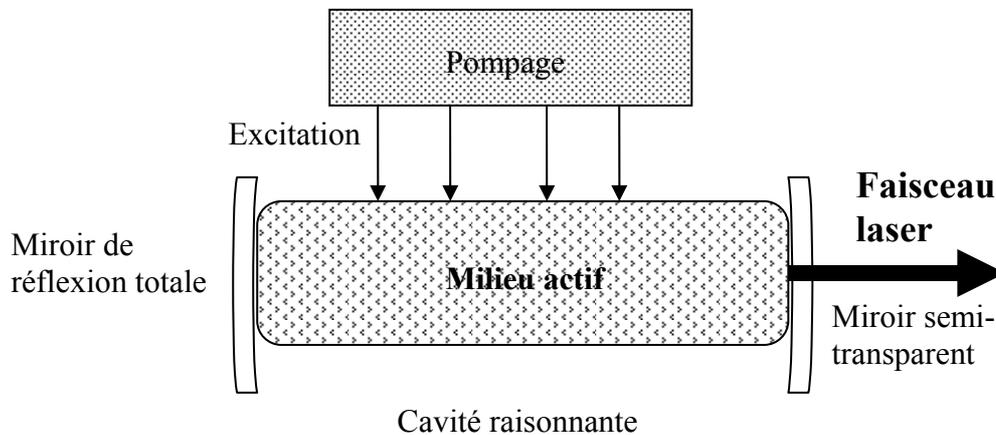
**Figure 3 : Principe de désexcitation émissive induite d'un atome excité (d'après Paschotta, 2008).**

### 1.1.3 FONCTIONNEMENT D'UN FAISCEAU LASER

Trois éléments sont indispensables pour obtenir l'effet laser :

- un milieu actif capable d'amplifier le rayonnement,
- un système de pompage qui excite le milieu actif et engendre l'inversion de population des atomes,

- une cavité raisonnante, qui contient le milieu actif: elle augmente l'amplification des photons et permet une sélection des fréquences émises (Fig. 4) (Paschotta, 2008).



**Figure 4 : Principe de fonctionnement d'un laser (d'après Paschotta, 2008).**

### 1.1.3.1 Le milieu actif

Il est composé d'atomes ou de molécules qui permettent l'émission stimulée d'un rayonnement lumineux. Ces atomes ou ces molécules doivent être capables de stocker l'énergie reçue du milieu extérieur pendant une durée suffisamment importante pour que le retour à l'état stable puisse être provoqué par l'émission de photons. Ce milieu actif peut être :

- solide : rubis (cristal d'alumine), pérovskite d'yttrium et d'aluminium dopé au néodyme (Nd : YAP), grenat d'yttrium et d'aluminium dopé à l'erbium (Er : YAG) ou au néodyme (Nd : YAG) ... ,
- liquide : colorants organiques (rhodamine, couramine, ...) dilués dans un solvant liquide,
- gazeux : hélium-néon, argon, krypton, mélange d'azote, d'hélium et de CO<sub>2</sub> ...

(Berlien et Müller, 2003).

### 1.1.3.2 Le phénomène de pompage ou inversion de population

Le mécanisme d'émission stimulée n'est possible que si les électrons habituellement au repos sur les niveaux fondamentaux se trouvent en majorité sur des niveaux excités. Or, il n'existe quasiment jamais d'atome à l'état excité dans un corps à l'équilibre thermique, pour une température ambiante. Le phénomène d'inversion de population des électrons est entretenu en fournissant au milieu actif une énergie provenant d'un système extérieur, qui provoque une excitation permanente des électrons et donc une inversion de population que l'on appelle « pompage ». En fonction du type d'énergie apportée au milieu laser, on définit différents mécanismes de pompage :

- le pompage optique qui a été le premier utilisé sous forme de tube flash,
- le pompage électrique qui peut s'effectuer,
  - soit par une décharge électrique dans les lasers à gaz,
  - soit en utilisant un semi-conducteur,
- le pompage chimique : combustion (flammes, explosion) (pour revue voir Bertolotti, 2004).

### 1.1.3.3 La cavité amplificatrice

La cavité amplificatrice est constituée de deux miroirs concaves, placés face à face et de part et d'autre du milieu actif ; ils sont séparés l'un de l'autre par une distance en relation avec la longueur d'onde émise. L'un des miroirs est semi-transparent. A l'intérieur de cette cavité optique, le rayonnement va subir de nombreuses réflexions entraînant un accroissement considérable des interactions photons-atomes excités. A l'amplification obtenue par l'émission stimulée s'ajoute l'amplification issue de la réflexion des photons sur les miroirs. Au-delà d'une certaine valeur seuil, l'amplification de l'intensité du rayonnement est telle que le faisceau laser traverse le miroir semi-transparent et se prête à toutes les possibilités d'utilisation extérieure au dispositif (Paschotta, 2008).

## **1.1.4 DIFFERENTS TYPES DE LASER**

(Pour revue voir Silfvast, 2004)

Les divers types de lasers sont classés en fonction du milieu actif utilisé.

### **1.1.4.1 Les lasers solides**

#### ***1.1.4.1.1 Les lasers à cristaux***

Le support cristallin renferme un élément actif en faible quantité. Cela est le cas du rubis où l'alumine renferme quelques centièmes de % d'oxyde de chrome ; ce laser émet dans le spectre de la lumière visible avec une longueur d'onde  $\lambda = 694,3\text{nm}$ .

#### ***1.1.4.1.2 Les lasers à verres dopés***

Le verre constitue le support dans lequel est coulé l'élément actif. Il existe des verres dopés au néodyme qui émettent avec une longueur d'onde  $\lambda = 1064,8\text{nm}$ .

Dans les deux types de lasers solides, l'élément actif doit posséder à la fois un niveau supérieur et des niveaux intermédiaires incomplètement saturés en électrons. Les éléments de la classification périodique de Mendeleieff répondent à cette double exigence.

La puissance des lasers solides est considérable. Elle peut en effet dépasser  $10^9$  watts. Toutefois, le rendement entre l'énergie émise par le faisceau et l'énergie consommée par le pompage ne dépasse pas quelques %.

L'homogénéité d'un support solide est difficile à assurer, ce qui fait que la cohérence spatiale de ces types de laser n'est pas parfaite et que le faisceau n'est pas strictement monochromatique du fait de la largeur des niveaux énergétiques concernés.

### **1.1.4.2 Les lasers à gaz**

L'homogénéité des milieux gazeux étant parfaite, les lasers à gaz ont une excellente cohérence spatiale et temporelle.

#### **1.1.4.2.1 Le laser hélium-néon**

Ce premier laser à gaz réalisé est constitué d'un mélange de ces deux gaz rares. Il émet dans le rouge et l'infrarouge avec les valeurs de longueur d'onde suivantes :

$$\lambda_1 = 630\text{nm} ; \lambda_2 = 1150\text{nm} ; \lambda_3 = 3390\text{nm}.$$

La directivité du faisceau est très précise, ce qui permet d'utiliser ce type de laser pour des problèmes de centrage ou de télémétrie. Il faut noter que sa puissance ne dépasse pas quelques centaines de watts et que son rendement est de quelques %.

#### **1.1.4.2.2 Le laser à CO<sub>2</sub>**

Le laser à CO<sub>2</sub> présente les avantages du laser hélium-néon. Il émet dans l'infrarouge avec  $\lambda = 10000\text{nm}$ . Sa puissance est nettement supérieure au précédent (quelques kilowatts) et son rendement est de l'ordre de 25%.

#### **1.1.4.3 Les lasers à semi-conducteurs**

Le phénomène d'inversion est ici réalisé par le passage d'un courant électrique. Ces lasers possèdent un rendement de près de 100%. La puissance est comprise entre le watt et le mégawatt.

Parmi les lasers à semi-conducteurs, on peut citer les lasers à :

- arseniure de gallium
- phosphore d'indium.

Les lasers les plus utilisés en fluxmétrie laser Doppler sont des lasers hélium-néon de faible puissance (1-3mW) émettant une lumière rouge d'une longueur d'onde généralement comprise entre 600 et 800nm. L'appareil utilisé au Pôle Odontologie du CHU de Nantes dans le cadre de cette étude est le système de dernière génération proposé par Perimed, le PeriFlux System 5000 (PERIMED, Suède) d'une longueur d'onde de 780nm pour une puissance de 1mW. Ces caractéristiques seront détaillées dans la suite de ce travail.

## **1.1.5 PROPRIETES DE LA LUMIERE LASER**

### **1.1.5.1 La cohérence spatio-temporelle**

Les caractéristiques du faisceau laser restent identiques au même moment en deux points différents, et en un même point à deux instants différents, car tous les photons le constituant ont une amplitude, une phase et une longueur d'onde identiques : tous les photons du faisceau sont indiscernables entre eux (Csele, 2004).

### **1.1.5.2 La monochromaticité**

Tous les photons du faisceau ayant les mêmes caractéristiques, le rayonnement laser possède une très grande pureté spectrale. Chaque type de laser possède une longueur d'onde propre. A chaque matériau correspond une absorption sélective de longueurs d'ondes déterminées (pour revue voir Bertolotti, 2004).

### **1.1.5.3 La directivité**

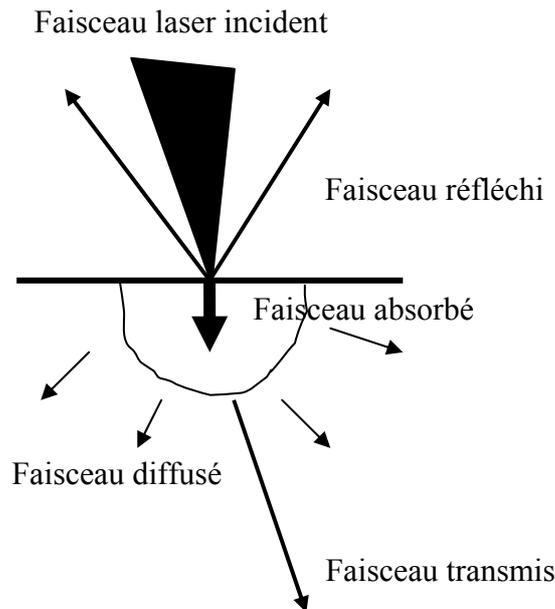
Cette propriété est issue de la cohérence spatiale du faisceau laser. Tous les photons sont identiques : ils ont la même quantité de mouvement, donc la même direction de propagation, donnant un aspect très directif au rayonnement, depuis son point d'émission jusqu'à l'infini (Berlien et Müller, 2003).

### **1.1.5.4 L'énergie ou luminance**

C'est la concentration énergétique des radiations photoniques par unité de temps et de surface. Les lasers sont des sources de lumière brillantes et intenses dont le rayonnement est caractérisé par une dispersion et une perte énergétique très limitées (pour revue voir Silfvast, 2004).

### 1.1.6 INTERACTION ENTRE UN FAISCEAU DE LUMIERE LASER ET LA MATIERE

En fonction des propriétés physiques du faisceau laser et de la nature de la matière rencontrée, quatre types d'interactions peuvent se produire : l'absorption, la réflexion, la diffusion et la transmission (Fig. 5) (pour revue voir Bertolotti, 2004).



**Figure 5 : Interactions laser/matière.**

- Absorption : les niveaux énergétiques excités sont peuplés ; le retour à l'état stable s'effectue par conversions internes et collisions ; l'énergie est rendue essentiellement sous forme de chaleur, ce qui entraîne une augmentation de température dans les tissus.
- Réflexion : lorsque le rayonnement rencontre la matière, sa vitesse change et une partie de la lumière incidente est réfléchi.
- Diffusion : il s'agit d'un changement de direction du rayonnement sans perte d'énergie ; ce processus résulte de la rencontre du rayonnement avec de petites particules.
- Transmission : le rayonnement laser passe à travers la matière sans changer sa longueur d'onde et sa direction ; il n'y a aucune perte d'énergie.

Pour chaque type de matière, il existe des coefficients d'absorption, de réflexion, de transmission et de diffusion, traduisant la complexité des interactions laser-matière (pour revue voir Silfvast, 2004).

## 1.2 L'EFFET DOPPLER

### 1.2.1 PRINCIPE DE L'EFFET DOPPLER



**Figure 6 : L'effet Doppler traduit une modification de la longueur d'onde d'une source vibratoire lorsqu'elle est en mouvement ou qu'elle percute un objet mobile. Lorsque l'ambulance se rapproche d'un sujet, la sirène devient plus aigüe. Lorsque l'ambulance s'éloigne, la sirène est plus grave.**

L'effet Doppler a été découvert en 1842 par Christian Doppler. Il est défini comme un changement de fréquence d'une source d'ondes entretenues lorsqu'il existe un déplacement relatif de la source ou de l'observateur (Doppler, 1842). En 1848, Hippolyte Fizeau a développé le même principe appliqué aux ondes électromagnétiques, c'est pourquoi le terme « effet Doppler-Fizeau » est également employé.

Quiconque ayant croisé une ambulance dont la sirène devient brutalement plus grave a pu expérimenter l'effet Doppler (Fig. 6). La fréquence perçue par l'observateur est différente de la fréquence émise : elle augmente si la source et/ou l'observateur se rapprochent ; elle diminue dans le cas inverse. Il est possible de mesurer ce changement de

fréquence appelé  $\Delta F$ . Il est égal à la soustraction entre la fréquence reçue  $F$  et la fréquence émise  $F_0$  ( $\Delta F = F - F_0$ ). Cette valeur  $\Delta F$  corrélée avec la vitesse du déplacement va permettre de calculer la fréquence reçue.

$$F = F_0 + \Delta F \quad \text{avec} \quad \frac{\Delta F}{F_0} = -\frac{2V}{C} \quad (V : \text{vitesse} ; C : \text{accélération})$$

Quand la direction du mouvement de l'obstacle fait avec la direction de propagation de la source un angle  $\theta$ , on montre que la relation précédente devient :

$$\frac{\Delta F}{F_0} = -\frac{2V}{C} \cos \theta$$

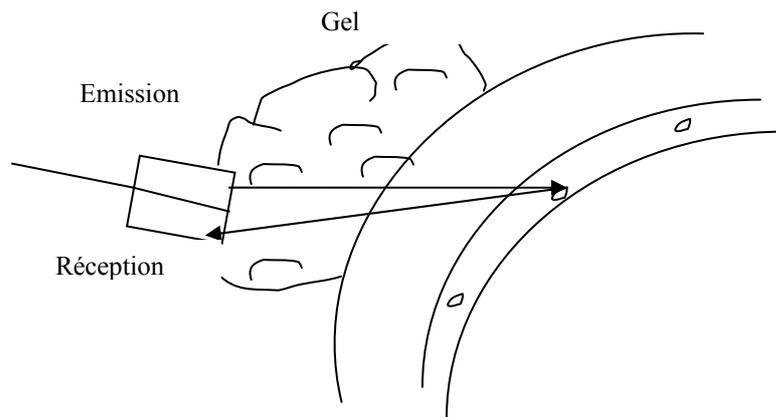
(Aurengo et coll., 2003 ; Serdyuk et coll. 2007).

Les applications médicales sont essentiellement les explorations échographiques cardiovasculaires dans le but de quantifier la vitesse des éléments figurés du sang dans les vaisseaux (Bueche et Hecht, 2002 ; Whittingham, 2007).

Dans le cas d'un faisceau d'Ultra Sons (US) envoyé par une sonde sur un vaisseau où circulent des hématies,  $F_0$  est connue,  $V$  désigne la vitesse d'écoulement des cellules sanguines,  $\cos \theta$  l'angle de la direction d'écoulement avec la direction du faisceau US incident et  $C$  la célérité moyenne des US dans les tissus mous. La mesure du décalage de fréquence  $\Delta F$  permet de connaître la vitesse d'écoulement du sang, connaissant  $C$  et  $\theta$  (Whittingham, 2007). Il convient de distinguer la vélocimétrie Doppler par émission continue et par émission pulsée.

## 1.2.2 VELOCIMETRIE DOPPLER A EMISSION CONTINUE

Cette technique utilise l'émission US continue, à fréquence  $F_0$ , par un transducteur et le recueil des ondes US réfléchies par un second transducteur, très proche du premier. Les échos de fréquence  $F_0$  sont éliminés (ils sont identiques à ceux recueillis en échographie standard), et un signal  $\Delta F$  est généré. Si un vaisseau se trouve dans le trajet du faisceau, on recueille non pas une seule fréquence  $\Delta F$ , mais un spectre continu compris dans un intervalle  $[\Delta F_{\min} - \Delta F_{\max}]$ , car tous les globules rouges ne se déplacent pas à la même vitesse. En effet, les vitesses dans un vaisseau sont maximales au centre, nulles aux bords, avec un profil parabolique aplati (Aurengo et coll., 2003 ; Whittingham, 2007).



**Figure 7 : Vélométrie Doppler à émission continue.**

Le signal électrique correspondant peut être analysé et son spectre séquentiel enregistré graphiquement. Cette technique a l'inconvénient de ne pas localiser l'origine du signal et ne permet donc pas de distinguer les signaux qui viennent de deux vaisseaux croisant le trajet du faisceau US (Fig. 7) (Aurengo et coll., 2003).

### 1.2.3 VELOCIMETRIE DOPPLER A EMISSION PULSEE

Cette méthode utilise un seul transducteur US qui émet de manière discontinue des impulsions US brèves. Dans l'intervalle entre deux impulsions, la sonde est utilisée pour constituer une image en mode dit B-temps réel. Il est possible de choisir sur l'écran de visualisation une direction et une distance d'exploration Doppler. Cela permet de sélectionner l'origine du signal Doppler analysé. L'image échographique permet de mesurer l'angle  $\theta$ , ce qui indique une mesure absolue de la vitesse des cellules sanguines, ainsi que le diamètre du vaisseau, ce qui permet d'estimer le débit sanguin.

La vélocimétrie Doppler à émission pulsée peut superposer à l'image échographique en niveaux de gris une « image fonctionnelle Doppler » qui code pour chaque pixel la vitesse d'un éventuel mouvement détecté par l'analyse Doppler. Les mouvements vers la sonde sont représentés en rouge d'autant plus intense qu'ils sont plus rapides, avec un codage bleu pour les mouvements qui s'éloignent du détecteur, et en vert pour les mouvements instables qui correspondent à des turbulences. Les tissus immobiles ne sont

pas modifiés et apparaissent en gris. On obtient donc en temps réel la représentation des vaisseaux d'une région avec des données anatomiques et fonctionnelles.

Cette technique présente cependant des limites. Elle ne peut ni analyser les mouvements circulatoires trop rapides, ni explorer les vaisseaux profonds (Bueche et Hecht, 2002 ; Aurengo et coll., 2003).

L'effet Doppler peut s'appliquer aussi bien aux ondes sonores (radars de contrôle routier) qu'aux ondes électromagnétiques, ce qui permet de calculer la vitesse d'un objet mobile à partir d'une source lumineuse. Pour ne pas masquer le décalage de la fréquence Doppler, la lumière utilisée devra être monochromatique, ce qui est le cas du rayonnement laser comme nous l'avons vu précédemment.

### **1.3 LA FLUXMETRIE LASER DOPPLER**

Le principe de la fluxmétrie laser Doppler, parfois dénommée vélocimétrie laser Doppler, repose sur l'effet Doppler appliqué au rayonnement laser. Cette technique permet de mesurer le flux sanguin, ou perfusion, d'un tissu grâce à l'effet Doppler et à une sonde optique. Le flux sanguin du tissu est estimé sans perturbation (Oberger, 1990).

#### **1.3.1 BASES DE LA FLUXMETRIE LASER DOPPLER**

##### **1.3.1.1 Généralités**

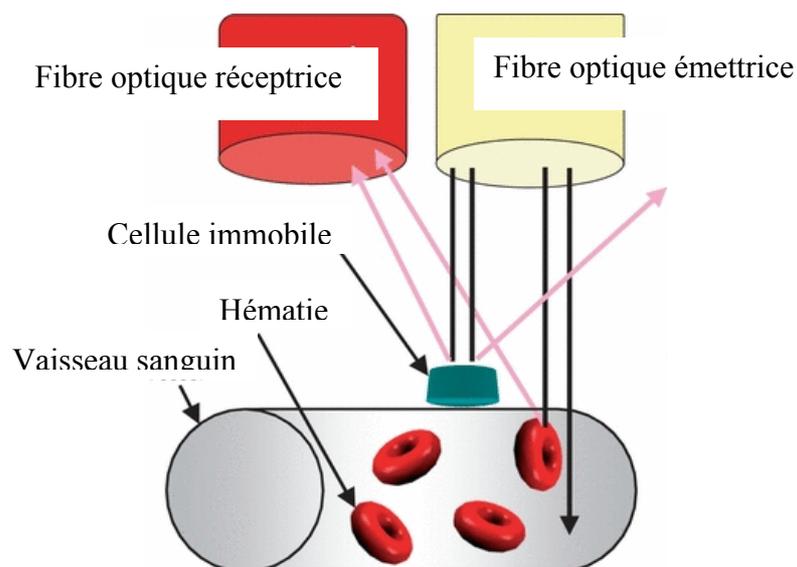
Un faisceau cohérent, monochromatique, d'une longueur d'onde connue, généré par un laser basse énergie est dirigé vers un tissu vascularisé grâce à l'utilisation d'une fibre optique. La longueur d'onde de la lumière est directement liée au type de laser utilisé (Oberger, 1990 ; Fredriksson et coll., 2007).

Les lasers les plus utilisés pour la mesure du flux sanguin sont des lasers hélium-néon de faible puissance (1-3mW) émettant une lumière rouge d'une longueur d'onde généralement comprise entre 600 et 800nm. Cette longueur d'onde est particulièrement bien adaptée à la

mesure du flux sanguin, car l'hémoglobine des hématies possède également une couleur rouge. Le rayonnement laser est donc réfléchi et non absorbé par les globules rouges. Aucune confusion ne doit être faite entre le terme de flux sanguin et celui de débit sanguin : la fluxmétrie laser Doppler mesure un flux de cellules sanguines et non pas un flux volumique, c'est-à-dire un débit (pour revue voir Jafarzadeh, 2009).

La fluxmétrie laser Doppler possède une excellente résolution spatiale. Le volume de cette résolution est de l'ordre de  $1\text{mm}^3$  mais celle-ci peut varier en fonction des propriétés d'absorption de la lumière émise dans le tissu étudié. Plus le tissu réfléchit une lumière monochromatique, plus la résolution spatiale augmente. Pour cette raison, la longueur d'onde, donc le type de laser employé, doit être adaptée à la profondeur du tissu ciblé (Fredriksson et coll., 2007).

La lumière émise par le laser en direction des structures microvasculaires percute des hématies en mouvement, provoquant une modification de longueur d'onde du faisceau incident. La lumière qui est réfléchie par des structures immobiles conserve sa fréquence d'émission. La sonde fluxmétrique incluant la fibre optique émettrice est composée de fibres optiques supplémentaires dont le rôle est de capter la fraction réfléchie de la lumière laser, composée de l'ensemble des longueurs d'ondes décalées et non décalées. Le principe de fonctionnement de la fluxmétrie laser Doppler est illustré dans la figure 8 (pour revue voir Jafarzadeh, 2009).



**Figure 8 : Effet Doppler appliqué au rayonnement laser (Jafarsadeh, 2009).**

Des photodétecteurs captent le signal lumineux réfléchi et le convertissent en un signal électrique dont l'intensité est proportionnelle au flux sanguin. Le traitement du signal donne une indication du flux sanguin des cellules sanguines en mouvement, qui est le produit de la vitesse et de la concentration de ces cellules.

		<b>Vitesse moyenne des cellules sanguines en mouvement dans le volume de mesure</b>		<b>Concentration des cellules sanguines</b>
<b>Flux sanguin</b>	=		×	

Ces données s'affichent sur un écran. Elles peuvent ensuite être traitées et enregistrées par un ordinateur pour une analyse plus approfondie et l'archivage (Oberg, 1990 ; pour revue voir Jafarzadeh, 2009).

Le fluxmètre laser Doppler doit être calibré et standardisé afin d'obtenir des mesures précises et reproductibles.

### 1.3.1.2 Calibrage

Pour Öberg (1990), la plupart des méthodes de mesure doivent être calibrées à intervalles réguliers grâce à une comparaison « standard » pour maintenir la précision des mesures dans le temps. Le standard généralement utilisé possède une précision bien définie et une stabilité à long terme. Un instrument calibré est réglé pour donner des lectures qui coïncident avec le dispositif de la technique standard. Une alternative consiste à réaliser une courbe d'étalonnage, c'est-à-dire un diagramme décrivant les différences entre les valeurs « standard » et les lectures données par l'instrument calibré. Ce diagramme est à ce jour impossible à mettre en œuvre avec les fluxmètres laser Doppler du fait de l'inexistence de mesures standards fiables à 100% pour le flux sanguin des différents tissus explorés (Öberg, 1990).

Les études expérimentales ont démontré que la fluxmétrie laser Doppler peut être calibrée en unité absolue (ml.mn<sup>-1</sup>.100g<sup>-1</sup> de tissu) pour un site de mesure défini. Cependant, ce calibrage ne peut être utilisé pour d'autres sites, que ce soit pour un même tissu ou un tissu

différent. Par ailleurs, il est impossible d'utiliser un calibrage en unité absolue en pratique clinique. En effet, le flux sanguin d'un tissu ne peut être arrêté pour obtenir un enregistrement de contrôle. Le flux sanguin étant également dénommé perfusion, les mesures réalisées par fluxmétrie laser Doppler sont exprimées en Unités de Perfusion (PU). Ces mesures sont proportionnelles au flux sanguin réel mais le facteur de proportionnalité peut varier d'un tissu à l'autre (Öberg, 1990 ; pour revue voir Jafarzadeh, 2009).

### **1.3.1.3 Standardisation**

La standardisation consiste à rendre les mesures obtenues stables et reproductibles. Différents dispositifs de standardisation des appareils de fluxmétrie laser Doppler ont été évoqués :

- le disque rotatif,
- les particules en suspension,
- les modèles de flux mécaniques.

La méthode de standardisation la plus souvent adoptée est celle des particules en suspension. Elle est basée sur le signal produit par le mouvement brownien d'une suspension de 0,5% de microsphères de polystyrène, de diamètre de 0,48 $\mu$ m, à une température de 20°C. Le mouvement brownien correspond au mouvement aléatoire d'une particule immergée dans un fluide qui n'est soumise à aucune interaction du fluide environnant (Öberg, 1990 ; Fredriksson et coll., 2007).

**La fluxmétrie laser Doppler apparaît comme étant une méthode d'investigation non invasive aux principes de fonctionnement simples. Des difficultés de calibrage inhérentes à la technique sont décrites. Son utilisation nécessite donc une bonne connaissance des caractéristiques des tissus étudiés pour pouvoir interpréter les résultats dans les différents contextes cliniques. Voyons à présent quelles sont les principales applications médicales de la fluxmétrie laser Doppler.**

## **1.3.2 EXEMPLES D'APPLICATIONS MEDICALES DE LA FLUXMETRIE LASER DOPPLER**

De nombreuses disciplines médicales ont saisi l'intérêt de la fluxmétrie laser Doppler. Parmi celles-ci, nous pouvons citer la dermatologie, la chirurgie plastique, l'angiologie, la chirurgie vasculaire, l'ophtalmologie et la neurologie.

### **1.3.2.1 La fluxmétrie laser Doppler en dermatologie et en chirurgie plastique**

La fluxmétrie laser Doppler s'est avérée être une technique de choix en dermatologie. Son utilisation est aisée sur le tissu cutané. Elle permet de mesurer la microvascularisation d'un territoire cutané, d'étudier les réactions inflammatoires, de suivre l'évolution de l'inflammation lors de prises de médicaments ou en présence d'allergènes, de mesurer le flux sanguin dans le suivi à long terme de pathologies cutanées et de quantifier la gravité de l'atteinte en cas de brûlure cutanée (pour revue voir Choi et Bennett, 2003 ; Yosipovitch et coll., 2004 ; Wilson et coll., 2005).

La fluxmétrie laser Doppler permet également de surveiller la microvascularisation d'un lambeau lors d'une intervention en chirurgie plastique. Dès 1990, Öberg décrit l'utilisation de la fluxmétrie laser Doppler dans le contrôle de suivi postopératoire d'un lambeau cutané. En effet, l'état microcirculatoire du lambeau est capital pour le succès ou l'échec du geste chirurgical. Les études expérimentales montrent que la fluxmétrie laser Doppler est la seule technique en mesure de déceler des signes de défaillances microcirculatoires d'un lambeau dans les premières vingt-quatre heures alors que les signes cliniques ne deviennent évidents que dans les deux à trois jours suivant l'intervention (Öberg, 1990).

### **1.3.2.2 La fluxmétrie laser Doppler en angiologie et en chirurgie vasculaire**

La fluxmétrie laser Doppler a montré son intérêt dans ces disciplines médicales en aidant à explorer spécifiquement le flux sanguin des vaisseaux les plus superficiels. Elle contribue ainsi à détecter les microangiopathies diabétiques et à l'étude des ischémies des membres ou du Syndrome de Raynaud (Stoyneva, 2004 ; Tang et coll., 2005).

Knobloch et coll. (2005) se sont intéressés à cette méthode pour la prise en charge des patients ayant subi une lésion de l'artère radiale. La fluxmétrie laser Doppler a été le moyen de montrer que dans ce type de lésion, la microvascularisation palmaire ne se développe pas de façon significative, ce qui implique des conséquences fonctionnelles.

### **1.3.2.3 La fluxmétrie laser Doppler en ophtalmologie**

L'état physiopathologique réel des vaisseaux rétiniens est difficile à objectiver. Cette particularité nous permet de mettre en évidence un point commun entre les difficultés diagnostiques rencontrées en ophtalmologie et celles rencontrées en odontologie dans le diagnostic de la vitalité pulpaire. En ophtalmologie, la fluxmétrie laser Doppler est inoffensive pour la rétine. En effet, l'intensité de la lumière laser de la fluxmétrie laser Doppler est très inférieure au seuil de risque d'un dommage rétinien. Cette technique peut donc être utilisée dans le suivi au long cours des processus pathologiques et offre la possibilité de suivre les effets microcirculatoires après une intervention chirurgicale (Öberg, 1990 ; pour revue voir Rechtman et coll., 2003).

### **1.3.2.4 La fluxmétrie laser Doppler en neurochirurgie**

Le système nerveux central est un organe complexe. Son exploration est difficile du fait de sa localisation intracrânienne. Le tissu cérébral se situe dans un milieu de faible élasticité intersticielle. La fluxmétrie laser Doppler permet une étude microcirculatoire cérébrale sans risque opératoire (Sheth et coll., 2005).

L'intérêt de la fluxmétrie laser Doppler a aussi été démontré dans la prise en charge et le suivi des compressions cérébrales, en permettant de constater une diminution du flux sanguin dans ce type de lésion. Cette méthode pourrait être étendue à l'examen des sciatalgies et des pathologies discales, où une compression médullaire est constatée (Igarashi et coll., 2005).

**La fluxmétrie laser Doppler a montré son intérêt dans différentes disciplines médicales. Cette méthode qui permet l'étude non invasive de la microvascularisation sanguine pourrait avoir un intérêt en odontologie pour l'établissement du diagnostic et du pronostic de la vitalité pulpaire.**

Dans la deuxième partie de ces généralités, nous présenterons les difficultés rencontrées dans l'établissement du diagnostic de la vitalité pulpaire. Nous aborderons les moyens actuels de diagnostic de la vitalité pulpaire en soulignant leurs avantages et leurs limites.

## **2. PROBLEMATIQUE DU DIAGNOSTIC DE LA VITALITE PULPAIRE**

Poser un diagnostic rapide et fiable face à des symptômes douloureux, soulager le patient de façon efficace constituent les défis quotidiens de l'odontologiste. De tels objectifs impliquent une bonne connaissance des mécanismes physiopathologiques à l'origine des pathologies pulpaires. Il paraît important de faire le point sur les connaissances de ces mécanismes.

### **2.1 *PHYSIOPATHOLOGIE DES REACTIONS PULPO-DENTINAIRES***

Lorsque la pulpe dentaire est à l'abri du milieu extérieur, protégée par les tissus durs qui l'entourent, elle assure ses fonctions dentino-génétiques, nutritives, sensorielles et de défense de l'organe dentaire.

La pulpe est néanmoins exposée à de multiples agressions qui peuvent être bactériennes (les caries), physiques (les traumatismes dentaires) ou chimiques (les matériaux). Les répercussions sur la pulpe dépendent de l'effet cumulatif des irritants (intensité et durée),

ainsi que des conditions histophysiologiques et pathologiques pré-existantes au sein du parenchyme pulpaire (Vreven et Noël, 2001 ; Öztürk et coll., 2004). Lors du phénomène carieux, l'invasion bactérienne commence dès lors que les bactéries ont déminéralisé l'émail. Puis, les bactéries pénètrent dans les tubuli dentinaires où elles libèrent des toxines susceptibles d'atteindre les odontoblastes et la pulpe. Une agression bactérienne est également possible en cas de maladie parodontale et d'effraction pulpaire d'origine traumatique ou iatrogène (Vreven et Noël, 2001 ; Ten Cate et coll., 2007). Face à ces agressions, la pulpe met en place différents mécanismes de défense. Nous décrirons successivement les réactions dentinaires puis pulpaires.

### **2.1.1 REACTIONS DENTINAIRES**

Ces phénomènes de défense ont pour objectif d'empêcher la progression des agents bactériens vers la pulpe. Ces réactions dentinaires sont de deux ordres. Le premier purement chimique aboutit à la fermeture des tubuli dentinaires (formation de dentine sclérotique) et le second met en jeu une réactivation des odontoblastes (formation de dentine réactionnelle) (Vreven et Noël, 2001 ; Ten Cate et coll., 2007). Nous allons décrire à présent ces mécanismes car ils peuvent expliquer les difficultés rencontrées dans la réalisation des tests de sensibilité ainsi que certaines de celles que nous rencontrerons en fluxmétrie laser Doppler.

#### **2.1.1.1 La dentine sclérotique**

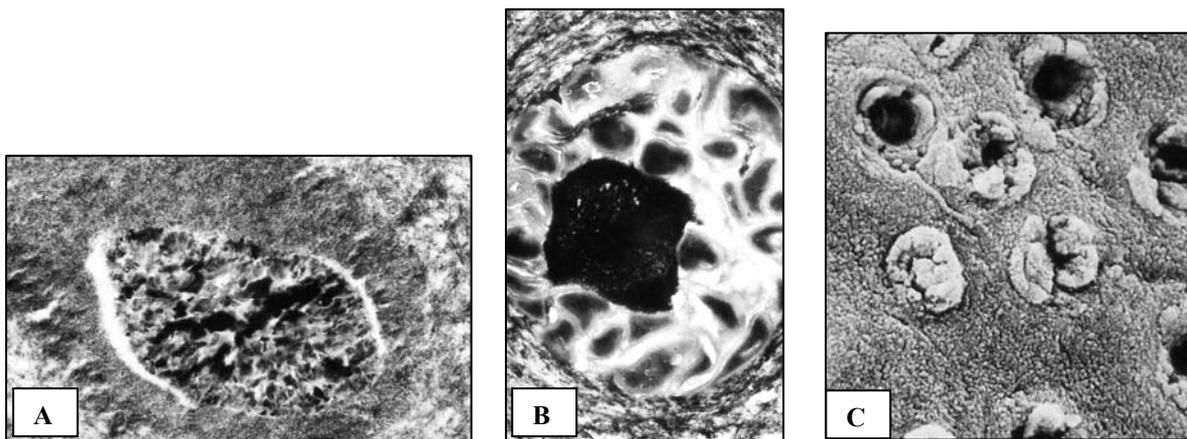
La sclérose dentinaire est la réponse la plus fréquente face à une agression d'origine carieuse. Les tubuli dentinaires situés en périphérie de la zone cariée sont oblitérés partiellement ou complètement par des sels phosphocalciques. Les tubuli dentinaires sont des canalicules situés dans la dentine qui contiennent un prolongement odontoblastique et un espace non minéralisé où se trouve le fluide transdentinaire. Le fluide transdentinaire composé d'eau, de ténascine, d'albumine, de protéoglycannes, de  $\alpha$ 2HS glycoprotéines et de collagènes de type I et V permet l'hydratation de la dentine, le dépôt de dentine intratubulaire et la transmission des pressions et des modifications de température.

Cette sclérose a pour conséquence la réduction de la permabilité de la dentine. Les tubuli dentinaires sont obstrués partiellement ou complètement par des sels phosphocalciques, des ions calcium et phosphate étant libérés par la déminéralisation de la dentine provoquée

par les acides organiques bactériens (Fig. 9 et 10) (Vreven et Noël, 2001 ; Giachetti et coll., 2002 ; Suppa et coll., 2006).



**Figure 9 : Formation de dentine sclérotique (coupe non décalcifiée, microscopie photonique).**

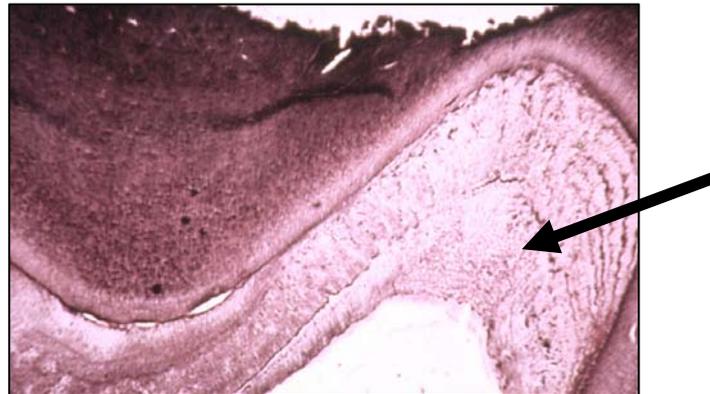


**Figure 10 : Les différents processus de fermeture des tubuli dentinaires. A : précipitation cristalline (microscopie électronique à transmission), B : minéralisation en présence de bactéries (microscopie électronique à transmission), C : exacerbation de la dentine péritubulaire (microscopie électronique à balayage).**

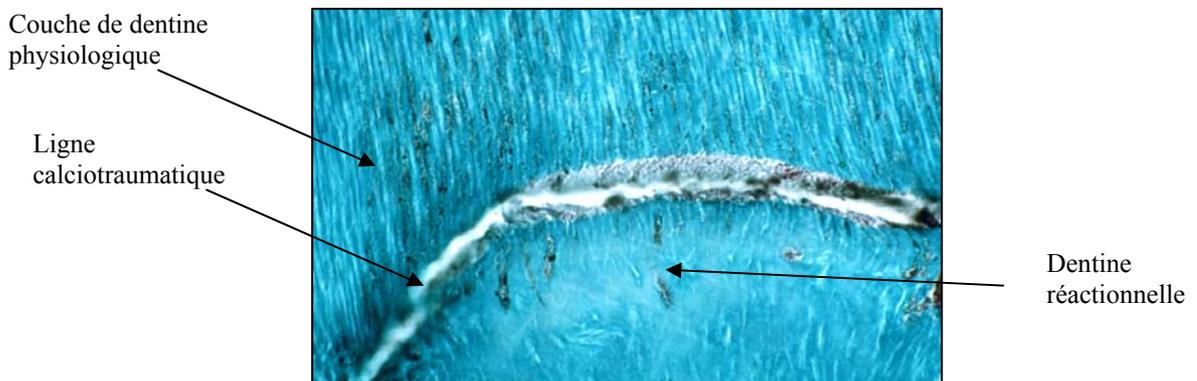
#### 2.1.1.2 La dentine réactionnelle

La synthèse de dentine réactionnelle est une réaction plus tardive, permettant d'augmenter l'épaisseur de dentine et de maintenir une distance entre la pulpe et l'agression le plus souvent bactérienne (Fig. 11). Cette synthèse se fait par réactivation des odontoblastes ou par différenciation des cellules de Höehl. Ces cellules ont la même origine que les

odontoblastes. Issues de la dernière mitose des préodontoblastes, elles se situent au niveau de la zone sous-odontoblastique. Elles sont susceptibles de se différencier en odontoblastes quand ceux-ci sont détruits. Cette zone de dentine réactionnelle est souvent atubulaire et non perméable. Elle est séparée de la dentine physiologique par une ligne calciotraumatique (Fig. 12) (Vreven et Noël, 2001).



**Figure 11 : Formation de dentine réactionnelle (coupe décalcifiée colorée, microscopie photonique).**



**Figure 12 : La ligne calciotraumatique (coupe décalcifiée colorée, microscopie photonique).**

### 2.1.1.3 Les tractus morts

Dans ces zones (Fig. 13), les prolongements odontoblastiques ont disparu à la suite de la mort précoce des odontoblastes, les tubuli sont donc ouverts et de ce fait beaucoup plus

perméables, mais la pulpe saine répond à la présence de ces tractus morts par la différenciation de néo-odontoblastes (des cellules souches de la pulpe dentaire se différencient) qui synthétisent une couche de dentine de réparation scellant l'extrémité des tubuli (Ten Cate et coll., 2007).



**Figure 13 : Tractus morts (coupe non décalcifiée, microscopie photonique).**

## **2.1.2 REACTIONS PULPAIRES**

Outre la formation de dentine réactionnelle, la pulpe peut répondre par des phénomènes inflammatoires ou par des processus dégénératifs (Bjorndal, 2001).

### **2.1.2.1 L'inflammation pulpaire ou la pulpite**

Les mécanismes inflammatoires sont identiques à ceux observés dans les autres tissus conjonctifs du corps humain. Cependant, les particularités de la pulpe font que l'évolution de ces mécanismes est beaucoup plus rapide que partout ailleurs. L'intensité de la réaction pulpaire varie en fonction de la vitesse de progression de l'agression.

Les premières apparitions de la réaction inflammatoire se localisent dans le réseau vasculaire de la couche sous-odontoblastique en regard de la carie ou du traumatisme. De manière constante, une réduction du nombre et de la taille des corps cellulaires des

odontoblastes est observée, accompagnée tout d'abord d'une vasodilatation capillaire et d'une stase circulatoire. Si l'agression perdure, un infiltrat inflammatoire se met en place, composé essentiellement de lymphocytes, de plasmocytes et de macrophages. Plus le phénomène est aigu, plus la quantité de polynucléaires neutrophiles augmente, leur activité de phagocytose entraînant la formation de micro-abcès dans la zone inflammatoire. Néanmoins, si l'agression est stoppée à ce stade, le tissu conjonctif peut reprendre un aspect normal ou former un tissu pulpaire cicatriciel, avec une prolifération de petits vaisseaux et de fibroblastes, ainsi qu'un dépôt de collagènes. Les pulpites sont donc dans un premier temps réversibles. Mais à ce stade, la pathologie pulpaire peut évoluer vers une inflammation chronique, caractérisée par un infiltrat lymphocytaire, plasmocytaire et macrophagique. La pulpite est irréversible : aucun retour *ad integrum* ne sera possible même à l'aide d'un traitement efficace éliminant les bactéries de la zone cariée (Vreven et Noël, 2001 ; Trowbridge, 2003 ; Tecles et coll., 2005).

#### **2.1.2.2 La nécrose pulpaire**

Elle survient lorsque les défenses mises en place au cours de l'inflammation ne peuvent éliminer les agents irritants. La vascularisation limitée dans la pulpe ne permet pas d'apporter un nombre suffisant de polynucléaires neutrophiles contre l'invasion bactérienne. La nécrose pulpaire est souvent accompagnée d'une pénétration bactérienne à l'intérieur de l'endodonte. Une liquéfaction de la pulpe (présence de pus) peut être provoquée par microorganismes pyogènes qui envahissent l'endodonte (Vreven et Noël, 2001 ; Weine, 2004). Il est important de ne pas laisser une dent avec une pulpe nécrosée car elle évoluera toujours vers une pathologie plus grave par pénétration des bactéries vers le périapex. Le traitement endodontique vise alors à assainir les canaux et à les obturer hermétiquement.

**Les réponses pulpaires aux irritations se traduisent donc par des réactions histopathologiques spécifiques qu'il conviendrait de classer pour établir un diagnostic histopathologique. La pulpe dentaire étant confinée dans une cavité, dont les parois minéralisées sont inextensibles, toute exploration directe est irréalisable. Il est donc impossible d'établir un diagnostic exact puisqu'aucun examen histopathologique n'est envisageable.**

Voyons quelles sont les conséquences de cette particularité de la pulpe dentaire sur le diagnostic de la vitalité pulpaire.

### **2.1.3 CONSEQUENCES SUR LE DIAGNOSTIC DE LA VITALITE PULPAIRE**

Il n'a pas été retrouvé de corrélation entre l'état histopathologique de la pulpe et les résultats des examens clinique, radiographique et des tests de sensibilité. Cela rend difficile de déterminer l'état réel de la pulpe au moment de l'examen (Newton et coll., 2009).

L'observation clinique ainsi que la réponse aux tests de sensibilité sont les seuls moyens diagnostiques dont dispose le chirurgien-dentiste.

Ce principe est à la base de la classification de Baume de 1962, classification basée sur des données cliniques et adaptée aux moyens thérapeutiques disponibles. Les pulpopathies y sont subdivisées du point de vue clinique en quatre catégories, comprenant à la fois des éléments de diagnostic symptomatologique et le type de traitement correspondant (Fig. 14) (Baume et Fiore-Donno, 1962).

#### **CATEGORIE I**

Pulpes vivantes, sans signe clinique, lésées accidentellement ou proches d'une carie ou d'une cavité profonde, susceptibles d'être protégées par un coiffage.

#### **CATEGORIE II**

Pulpes vivantes avec symptomatologie, dont on tentera de conserver la vitalité par coiffage ou par biopulpotomie.

#### **CATEGORIE III**

Pulpes vivantes avec symptomatologie irréversible pour lesquelles l'extirpation et l'obturation radiculaire immédiate sont indiquées.

#### **CATEGORIE IV**

Pulpes nécrosées avec infection de la dentine radiculaire exigeant un traitement antiseptique.

**Figure 14 : Classification de BAUME (Baume et Fiore-Donno, 1962).**

Les décisions thérapeutiques, à savoir la conservation pulpaire ou le traitement canalaire sont encore aujourd'hui dictées par la classification de Baume. Même s'il faut admettre que certains diagnostics sont difficiles à déterminer avec certitude, le praticien fait reposer sa décision sur un faisceau de présomptions que nous allons détailler dans le chapitre suivant.

## **2.2 MOYENS ACTUELS DE DIAGNOSTIC DE LA VITALITE PULPAIRE**

Le diagnostic de la vitalité pulpaire est une étape essentielle car elle permet un choix raisonné de la thérapeutique à appliquer. Cette phase initiale a pour but de poser l'indication d'un traitement canalaire. Le diagnostic de la vitalité pulpaire s'inscrit dans une prise en charge bucco-dentaire globale du patient. Cela implique une démarche logique, comprenant une anamnèse, un examen clinique et des examens complémentaires, au premier rang desquels se trouve la radiographie. Les principes généraux de cet abord du patient vont être revus brièvement puis les moyens de diagnostic de la vitalité pulpaire seront détaillés.

### **2.2.1 L'ANAMNESE EN ODONTOLOGIE**

L'anamnèse a pour objectif de recueillir auprès du patient ou de ses accompagnants tous les renseignements pertinents sur ces antécédents médicaux et l'évolution de la pathologie pour laquelle il consulte. Cet interrogatoire permet de préciser l'identité du malade, son âge, le motif de consultation, ses antécédents généraux et loco-régionaux, comprenant son histoire dentaire au sens large. L'anamnèse permet aussi de connaître les éventuelles contre-indications d'un traitement, qu'il s'agisse d'un geste thérapeutique ou d'une prescription médicamenteuse (Bricker et coll., 2002 ; Jordan et Lewis, 2004).

## 2.2.2 L'EXAMEN CLINIQUE EN ODONTOLOGIE

(Bricker et coll., 2002 ; Jordan et Lewis, 2004)

L'examen clinique permet ensuite au praticien de découvrir toutes les anomalies bucco-dentaires qu'il sera amené à traiter ainsi que tous les signes buccaux liés à des pathologies générales connues ou non du patient. Le temps de l'examen clinique commence dès l'entrée du patient dans la salle d'examen en appréhendant des informations sur la stature, la démarche, la gestuelle, l'attitude, l'aspect de la peau, du faciès ou la voix du patient. Ces éléments peuvent déjà orienter le praticien vers un problème médical non décelé ou un contexte social ou psychologique particulier. L'examen clinique implique une observation de la cavité buccale dans son ensemble. Il comprend l'inspection, la palpation exo-buccale et endo-buccale.

L'examen exobuccal consiste à observer les principales structures de la tête et du cou pour déceler d'éventuelles anomalies. En fonction du contexte propre à chaque patient et du motif de consultation, l'attention du praticien se porte sur des asymétries éventuelles, la présence de tuméfaction, la palpation des muscles, des chaînes ganglionnaires cervico-faciales, les articulations temporo-mandibulaires, l'ouverture buccale, les sinus.

L'examen endo-buccal permet d'évaluer globalement l'état de santé bucco-dentaire du patient. Il consiste à apprécier l'hygiène du patient, la présence ou l'absence de dents et de prothèses, l'état des dents, des tissus de soutien, l'occlusion et d'éventuelles lésions des tissus mous. Il est visuel puis se poursuit à l'aide d'un miroir, d'une sonde droite, d'une sonde 17 et d'une sonde parodontale. Sans procéder à une revue de tout ce qui peut affecter la cavité buccale, nous retiendrons qu'il est important de rechercher :

- au niveau dentaire : des caries, des restaurations défectueuses voire nocives, des dyschromies dentaires, des fêlures ou des fractures, des anomalies de structure,
- au niveau parodontal : une inflammation gingivale, la présence de plaque, des récessions, des abcès, des fistules,
- au niveau des tissus mous environnants : une cellulite,
- au niveau fonctionnel : des interférences occlusales, des mobilités anormales, une gêne fonctionnelle.

La palpation se pratique avec la pulpe de l'index ganté. Elle permet de rechercher une sensibilité provoquée, une tuméfaction, un signe de fluctuation, la dureté ou la crépitation des tissus sous-jacents.

Selon le motif de consultation du patient, cet examen général est complété par un examen plus spécifique. Si le praticien suspecte une pathologie pulpaire, il doit porter une attention particulière à la douleur décrite par le patient, puis, il oriente son examen vers la région incriminée par le patient. Des tests de sensibilité viennent compléter cet examen. D'autres tests, tels que les tests de percussion peuvent aussi fournir des renseignements. Enfin, des radiographies sont réalisées.

### **2.2.3 LA DOULEUR DANS LE DIAGNOSTIC DE LA VITALITE PULPAIRE**

En Odontologie, le motif de consultation le plus fréquent est la douleur (Nusstein et Beck, 2003). La douleur témoigne de l'altération physique d'un organe. Les mécanismes physiologiques émotionnels et neurobiologiques mis en jeu ne seront pas décrits ici. Nous nous limiterons à l'analyse de la douleur dans le diagnostic de la vitalité pulpaire. Il faut pour cela dans un premier temps réussir à qualifier cette douleur (Jantsh et coll., 2005). L'anamnèse présente une valeur diagnostique limitée du fait de l'interprétation subjective de la douleur, qui dépend des facteurs culturels, intellectuels et psychologiques propres au patient. Il est en effet difficile de décrire le ressenti de la douleur qui est propre à chaque individu, d'autant plus que la douleur est un phénomène complexe, intégrant des sensations physiques, des émotions, des souvenirs et des anticipations. Une échelle analogique peut aider le patient à quantifier sa douleur (Jantsh et coll., 2005).

Le praticien fait préciser l'intensité de cette dernière et demande au patient si elle est spontanée ou provoquée. Il faut être conscient qu'une douleur peut être ressentie spontanément sans signe déclenchant apparent, être disproportionnée par rapport au stimulus décrit ou être absente malgré une pathologie évidente (lésion carieuse volumineuse par exemple).

La douleur bucco-dentaire présente des caractéristiques sémiologiques qui orientent le praticien. Il convient donc de les exposer :

- douleur aiguë : durée en heures,
- douleur chronique : durée sans rémission en jours,
- douleur légère : sans retentissement physique et/ou psychologique,
- douleur vive : avec retentissement physique et/ou psychologique,
- douleur sourde : moins vive, mal définissable par le patient,

- douleur térébrante : impression subjective que la douleur creuse,
- douleur gravative : impression de pesanteur,
- douleur fugace : extrêmement brève, qui disparaît quasi immédiatement,
- douleur intermittente : épisodes indolores entre phases d'accès douloureux,
- douleur continue,
- douleur fulgurante : avec renforcements en éclair très brefs et intenses sur fond continu,
- douleur pulsatile : rythmée par le pouls,
- douleur lancinante,
- douleur diffuse : difficile à préciser, concerne toute une région,
- douleur localisée,
- douleur synalgique : ressentie en un siège différent de celui de l'organe causal.

Des signes d'accompagnement de la douleur peuvent se manifester :

- signes tégumentaires : érythème, œdème, congestion (œdème et rougeur),
- signes moteurs : spasme, trismus, torticolis,
- signes sécrétoires : rhinorrhée, sialorrhée, hyposialie, larmoiement, hypersudation (Bender, 2000).

La sensibilité du complexe dentino-pulpaire est due à l'excitation des fibres nerveuses situées au sein de ce complexe (Jantsh et coll., 2005). L'innervation pulpaire sera décrite dans le paragraphe consacré aux tests de sensibilité. Il convient de distinguer les douleurs générées par les différentes pathologies pulpaires :

- inflammation pulpaire réversible : le patient décrit une douleur provoquée par le froid, le chaud, le sucré et/ou l'acide,
- inflammation pulpaire irréversible : le patient décrit une douleur intense, irradiée, pulsatile, intermittente, déclenchée par une différence de température et qui se prolonge après le stimulus en cas de pulpite aiguë ; la douleur peut être fruste voire absente en cas de pulpite chronique,
- nécrose pulpaire : la douleur peut être absente tant que la pathologie est limitée à l'endodonte puis dès que l'infection s'étend au péri-apex et aux tissus péri-maxillaires, la douleur est constante, intense et lancinante (Bender, 2000 ; Levin et coll., 2009).

Un interrogatoire bien mené participe à la description précise de la douleur et oriente sur le diagnostic. Une observation clinique rigoureuse de la zone concernée doit suivre.

## **2.2.4 L'OBSERVATION CLINIQUE DANS LE DIAGNOSTIC DE LA VITALITE PULPAIRE**

(Johnson, 2002 ; Weine, 2004 ; Torabinejad et Walton, 2008)

Dans le cadre spécifique du diagnostic de la vitalité pulpaire, le praticien se concentre sur l'examen de la région incriminée par le patient, et la compare si besoin aux régions voisines et controlatérales. Il recherche :

- une ou des lésions carieuses,
- des restaurations défailtantes,
- une fêlure,
- un traumatisme récent responsable de lésions dento-alvéolaires, de fractures, d'extrusions, de luxations, d'intrusions, de lacérations des tissus mous,
- un changement de coloration (grise, brune, noire ou rose) de la couronne de la dent concernée qui peut provenir d'une formation excessive de dentine réactionnelle, d'une dégénérescence pulpaire, de la désintégration de l'hémoglobine à la suite d'un traumatisme ayant causé un hématome intrapulpaire, d'une résorption interne,
- la présence d'une fistule chronique,
- une mobilité en rapport avec une perte du support osseux, une affection parodontale, un traumatisme occlusal ou dentaire.

Il convient aussi d'examiner l'aspect des tissus mous qui peuvent être le siège d'une tuméfaction dure ou molle. La palpation peut mettre en évidence une déformation ou une sensibilité permettant de détecter une atteinte de l'os alvéolaire et des tissus mous avoisinants au cours d'une inflammation périapicale. Une palpation apicale très douloureuse est caractéristique d'une collection suppurée.

Un sondage parodontal peut être effectué si une pathologie endo-parodontale est suspectée.

L'examen peut être approfondi par transillumination : une fibre optique ou à défaut une lampe à photopolymériser, est placée perpendiculairement à la dent examinée pour visualiser la présence de fêlures ou de caries proximales.

## **2.2.5 LES TESTS DE SENSIBILITE PULPAIRE**

Les tests de sensibilité pulpaire sont pratiqués pour aider le praticien à établir un diagnostic de la vitalité pulpaire et à choisir le traitement le plus approprié. Ils sont réalisés dans l'idée de tenter de déterminer si la pulpe est vivante ou non. Le chirurgien-dentiste peut aussi avoir recours aux tests de sensibilité pour distinguer entre deux dents présentant des lésions carieuses celle qui est la cause des douleurs décrites par le patient. Ces tests sont basés sur la réponse douloureuse ou non à la stimulation des fibres nerveuses dentaires sensibles. Par conséquent, même si les tests thermiques et électriques sont couramment qualifiés de tests de vitalité pulpaire, ce terme n'est pas approprié. La subjectivité de la douleur et le seuil de sensibilité à la douleur sont des éléments variables, propres à chaque individu. Le praticien doit donc expliquer les tests au patient, faire preuve de délicatesse dans leur exécution et de prudence dans l'interprétation des résultats. Les tests de sensibilité sont d'abord et systématiquement effectués sur des dents saines dites témoins pour disposer d'un élément de comparaison (Newton et coll., 2009). Avant de présenter en détails les trois grands tests de sensibilité que sont le test au froid, le test au chaud et le test électrique, il convient de revenir sur l'innervation pulpaire.

### **2.2.5.1 Rappels sur l'innervation pulpaire**

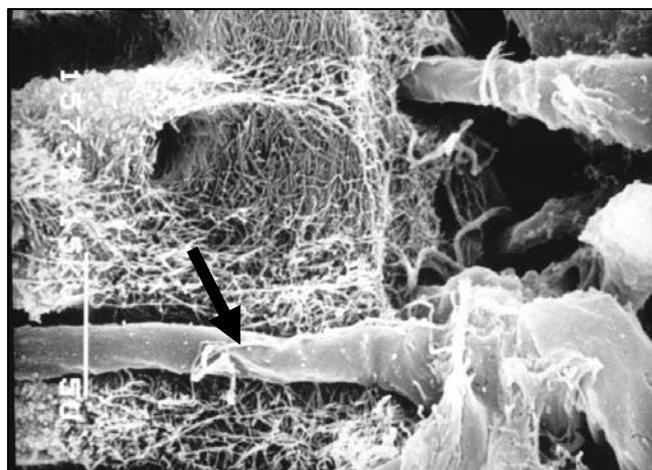
L'innervation sensitive a pour origine les nerfs dentaires supérieurs et inférieurs ( $V_2$  et  $V_3$  : deux des trois divisions du nerf Trijumeau). Les corps cellulaires des fibres nerveuses sensibles pulpaires sont situés au niveau du ganglion de Gasser (Farges et Magloire, 2001 ; Abd-Elmeguid et Yu, 2009a). Les fibres nerveuses pénètrent dans la dent par le foramen apical sous forme de faisceaux myélinisés. Elles cheminent parallèlement aux axes vasculaires et se regroupent au centre de la pulpe en un faisceau volumineux. Celui-ci se divise dans la pulpe coronaire en nerfs cuspidiens, qui se ramifient à leur tour, pour se terminer à la périphérie pulpaire, dans la zone sous-odontoblastique, où les terminaisons constituent le plexus de Rashkow. Les fibres myélinisées perdent leur gaine de myéline au fur et à mesure qu'elles arrivent en périphérie pulpaire. Le plexus de Rashkow est donc presque exclusivement constitué de fibres amyéliniques ; il contient de nombreuses terminaisons libres (Nanci, 2007 ; Abd-Elmeguid et Yu, 2009a).

Parmi les fibres sensibles il convient de distinguer :

- les fibres A-Delta caractérisées par un diamètre de 1 à 4 $\mu$ m et une vitesse de conduction de 4 à 30m/s ; elles véhiculent les sensibilités thermiques, les douleurs aiguës et épicritiques (soins),
- les fibres A-Beta caractérisées par un diamètre de 6 à 10 $\mu$ m, une vitesse de conduction de 30 à 80m/s ; elles transmettent les informations tactiles et proprioceptives non douloureuses telles que les vibrations,
- les fibres C qui représentent la majorité des fibres nerveuses pulpaire ; leur diamètre varie de 0,1 à 1 $\mu$ m et leur vitesse de conduction de 0,5 à 2m/s ; leur seuil d'activation est supérieur au groupe A-Delta ; elles sont chimiosensibles et thermosensibles (inflammation) ; elles transmettent les informations nociceptives de douleurs sourdes et diffuses ; elles libèrent des neuromédiateurs responsables de l'inflammation pulpaire (substance P).

Il existe 3 types de terminaison des fibres nerveuses :

- à proximité des corps des odontoblastes (cellules différenciées, organisées en palissade en regard de la dentine, présentant un prolongement odontoblastique qui s'étend dans la dentine et permet la sécrétion de la prédentine et la minéralisation de la dentine), sous la forme d'un réseau dense appelé plexus nerveux sous-odontoblastique ou plexus de Rashkow,
- dans la prédentine (trame matricielle de la dentine sécrétée par les odontoblastes peu ou pas minéralisée),
- dans les tubuli dentinaires, à proximité des prolongements odontoblastiques (Fig. 15).



**Figure 15 : Terminaisons nerveuses au sein des tubuli dentinaire (microscopie électronique à balayage) (Jean et coll., 1986).**

Le signal douloureux est le seul message susceptible d'être transmis, quel que soit le stimulus, au niveau de l'innervation pulpaire contrairement à l'innervation cutanée qui distingue le chaud, le froid et la douleur. Trois théories sont proposées pour expliquer la transmission douloureuse :

- la théorie hydrodynamique : le déplacement du fluide transdentinaire provoqué par un stimulus exciterait les fibres nerveuses intratubulaires ou intrapulpaires (Farges et Magloire, 2001),
- la théorie de la transmission directe : la fibre nerveuse serait directement excitée par le stimulus (Farges et Magloire, 2001),
- la théorie odontoblastique : l'odontoblaste se comporterait comme une cellule mécano-sensible impliquée dans la transmission des stimuli et de l'information douloureuse ; l'odontoblaste serait capable de traduire le mouvement du fluide transdentinaire en signaux électriques (Magloire et coll., 2009).

L'innervation vaso-motrice est d'origine sympathique. Les corps cellulaires se situent au niveau du ganglion cervical supérieur (Farges et Magloire, 2001).

Les fibres nerveuses pénètrent dans la pulpe par deux voies. La voie principale, dans laquelle les fibres issues du ganglion cervical supérieur cheminent le long des artères carotides, puis des artères maxillaires et pénètrent dans la pulpe avec les artères dentaires supérieures et inférieures. La voie secondaire, dans laquelle quelques fibres nerveuses sympathiques rejoignent le ganglion de Gasser et cheminent avec les fibres nerveuses sensitives. Les fibres vaso-motrices présentent des rapports étroits avec les vaisseaux sanguins pulpaires, dont elles contrôlent le débit en induisant une constriction ou une dilatation (Iijima et Zhang, 2002 ; Nanci, 2007). Parmi ces fibres, il existe des fibres nerveuses adrénérgiques responsables de la constriction des vaisseaux et des fibres cholinérgiques responsables de leur dilatation. Des neuromédiateurs tels que la substance P, la somatostatine, le CGRP (Calcitonin Gene Related Peptid) participent à la régulation du flux sanguin pulpaire (Nanci, 2007).

## **2.2.5.2 Tests thermiques**

### **2.2.5.2.1 *Test au froid***

#### **2.2.5.2.1.1 Protocole**

Le test au froid est réalisé par application du spray d'air, de neige carbonique, de dichlorotétrafluoroéthane ou de dichlorofluorométhane (Jones et coll., 2002 ; Weine, 2004). Une température inférieure à 13°C est suffisante pour déclencher une réponse.

Ce test, comme tout autre test, est réalisé sur des dents séchées au préalable, en commençant par une dent supposée saine avant les dents mises en cause par le patient pour pouvoir effectuer la comparaison des résultats. Le produit est pulvérisé sur une boulette de coton, tenue entre les mors d'une précelle, jusqu'à ce que les fibres de coton givrent, puis, la boulette de coton est appliquée sur la face vestibulaire de la dent testée, à proximité du collet. La réaction du patient est observée. La boulette de coton est retirée si le patient réagit ou elle est laissée en place jusqu'à ce qu'elle ait perdu son potentiel thermique en absence de réaction du patient (Jones, 1999 ; Jones et coll., 2002 ; Abd-Elmeguid et Yu, 2009b ; pour revue voir Gopikrishna et coll., 2009).

#### **2.2.5.2.1.2 Principe**

L'application de froid sur une dent à pulpe saine est responsable d'un refroidissement de l'émail de la dent, puis de la dentine ce qui déclenche un mouvement du fluide transdentinaire vers l'extérieur. Cette réaction induit l'activation des fibres nerveuses A-Delta, provoquant chez le patient une sensation de douleur aiguë, localisée et reproductible (Brannström, 1986).

#### **2.2.5.2.1.3 Réponses**

Un test au froid sur dent à pulpe saine doit être positif, le patient ressentant une sensation de gêne ou de douleur légère à modérée mais limitée dans le temps. Une douleur vive, intense et durable par rapport aux dents témoins permet d'orienter le diagnostic vers une

inflammation pulpaire irréversible. Dans le cas d'une inflammation pulpaire chronique, le patient peut ressentir une sensation de gêne, de très légère douleur mais, le plus souvent, un retard de réponse au stimulus est observé. Une douleur diminuée par le froid ou l'absence de réponse peuvent correspondre à une nécrose pulpaire (Michaelson et Holland, 2002 ; Miller et coll., 2004 ; Weine, 2004).

#### 2.2.5.2.1.4 Limites

L'observation clinique, corrélée aux symptômes douloureux décrits par le patient et à une réponse douloureuse intense au test au froid nous orientent avec certitude vers le diagnostic d'une inflammation pulpaire irréversible, le test au froid permettant de discriminer la dent causale en cas d'hésitation entre plusieurs dents. Mais, dans les autres situations cliniques, le doute est possible car des sources d'erreur existent. Une absence de réponse au test peut être liée à des phénomènes de minéralisation. Le test au froid est fondé sur le principe des mouvements du fluide transdentinaire ressentis par les terminaisons nerveuses ou les odontoblastes pulpaires. Cependant lors des processus carieux, les ions phosphate et calcium peuvent précipiter à l'intérieur des tubuli dentinaires provoquant leur oblitération (sclérose dentinaire). Le refroidissement du fluide transdentinaire n'est alors pas (ou peu) ressenti par le patient.

Sur les dents pluriradiculées, un test au froid peut être positif du fait de la persistance de tissu vivant dans une des racines alors que les autres racines présentent une pulpe nécrosée.

Des réponses négatives surviennent chez les patients ayant subi un traumatisme dentaire du fait de la paresthésie transitoire des fibres nerveuses pulpaires occasionnée par le choc (sidération pulpaire) et chez les personnes âgées du fait de l'importance de la dentine sclérotique.

De plus, il faut être conscient que les obturations coronaires en composite sont des isolants thermiques tandis que les obturations métalliques sont des conducteurs thermiques (Peters et coll., 1994 ; Petersson et coll., 1999 ; Weine, 2004 ; pour revue voir Gopikrishna et coll., 2009).

Des réponses négatives sont retrouvées sur des dents vivantes chez les jeunes patients dont les dents sont encore immatures car leur innervation pulpaire est éparse, ce qui les rend moins réceptives aux stimuli thermiques que les dents matures, l'innervation pulpaire n'arrivant à maturité qu'avec la fermeture des apex radiculaires (Nanci, 2007).

## 2.2.5.2.2 *Test au chaud*

### 2.2.5.2.2.1 Protocole

Le test au chaud est réalisé par application de pâte thermoplastique (Stent's de Kerr) ou de gutta percha chaude que l'on chauffe idéalement à une température de 55°C dans le cas de la pâte thermoplastique et 65°C dans le cas de la gutta-percha. La gutta-percha est le produit le plus utilisé pour réaliser des tests au chaud. Elle est chauffée avec une flamme à alcool pour prendre un aspect ramolli, mais non fumant, puis appliquée avec pression sur la face vestibulaire des dents testées, à distance de la gencive. La pâte de Kerr peut également être utilisée. Ce test, comme tout autre test, doit être débuté sur une dent supposée saine et doit être réalisé sur des dents séchées au préalable puis enduite d'un corps gras de type vaseline pour éviter que le matériau utilisé pour le test n'adhère à l'émail (Petersson et coll., 1999 ; Weine, 2004 ; pour revue voir Gopikrishna et coll., 2009).

### 2.2.5.2.2.2 Principe

L'application de chaud sur une dent à pulpe vitale et saine est responsable d'une augmentation de température de l'émail de la dent, puis de la dentine ce qui déclenche un mouvement du fluide transdentinaire vers l'intérieur. Cette réaction induit l'activation des fibres nerveuses A-Delta ou des odontoblastes comme pour le test au froid (Brannström, 1986).

### 2.2.5.2.2.3 Réponses

Les réponses obtenues sont équivalentes à celles obtenues avec le test au froid. Le test s'avère positif avec une dent à pulpe saine et une dent présentant une inflammation pulpaire réversible. La douleur est exacerbée en cas d'inflammation pulpaire.

Un test au chaud très douloureux caractérise la présence de micro-abcès à l'intérieur de la pulpe ou une nécrose complète du tissu pulpaire avec complications infectieuses péri-apicales. La chaleur produit dans ces cas particuliers une expansion des gaz de putréfaction occlus dans la dent ou du pus, ce qui exerce une pression sur les fibres nerveuses pulpaires résiduelles et sur celles du périapex (Petersson et coll, 1999 ; Weine, 2004).

#### 2.2.5.2.2.4 Limites

Nous retrouvons ici les limites du test au froid : les dents minéralisées, les dents pluriradiculées en raison de la possible coexistence sur une même pulpe de sites inflammatoires et de sites de nécrose, les dents permanentes immatures et la présence de restaurations. A cela, nous devons ajouter que le fait de chauffer la gutta percha ou la pâte de Kerr ne permet pas de connaître la température exacte du matériau au moment des tests. Il en résulte qu'une température trop faible peut entraîner de fausses réponses négatives et qu'une température trop élevée peut être à l'origine de lésions pulpaires. Si une réponse douloureuse au test au chaud nous permet de poser le diagnostic d'une inflammation pulpaire irréversible ou d'une nécrose pulpaire, impliquant un traitement endodontique, il est impossible d'établir un diagnostic de l'état pulpaire en cas d'absence de réponse au test au chaud (Petersson et coll., 1999 ; pour revue voir Gopikrishna et coll., 2009).

Les tests thermiques sont informatifs lorsqu'ils déclenchent une réponse douloureuse chez les patients. Ils sont très utiles pour diagnostiquer la dent en cause dans des douleurs de pulpite. L'intensité de la réponse varie d'un individu à l'autre. De plus, des modifications du seuil douloureux peuvent être engendrées par le stress (diminution du seuil) ou par la prise de sédatifs ou d'analgésiques (augmentation du seuil). La réponse au test est influencée par différents facteurs tels que l'épaisseur de l'émail, l'épaisseur de dentine secondaire ou tertiaire, le seuil douloureux, l'état émotionnel du patient et l'âge du patient. En effet, les tests de sensibilité sont difficilement interprétables en odontologie pédiatrique. L'absence de réponse à un test au froid ou à un test au chaud ne permet pas de poser le diagnostic d'une dent nécrosée. D'autres tests sont donc nécessaires en cas d'absence de réponse.

#### **2.2.5.3 Test électrique**

Le test électrique est basé sur la réaction du tissu pulpaire à une stimulation provoquée par un courant électrique. La réaction pulpaire est très différente selon que la pulpe est vitale ou nécrosée. L'objectif du test électrique est donc de discriminer une dent à pulpe vitale d'une dent à pulpe nécrosée.

#### **2.2.5.3.1 Protocole**

La dent à tester est détartrée ou nettoyée si nécessaire car du tartre, de la plaque bactérienne ou des débris alimentaires pourraient empêcher le contact électrode-dent ou conduire le courant au parodonte. Puis la dent est isolée avec des rouleaux de coton et séchée avec de la gaze ou du coton car le séchage à air provoque déjà une excitation pulpaire. L'extrémité de l'électrode est enduite d'un agent électrolytique tel que de la pâte dentifrice puis elle est placée au contact de la dent à tester sur la face vestibulaire à proximité du collet de la dent, c'est-à-dire à l'endroit où l'émail est le plus mince. Le courant électrique est augmenté progressivement jusqu'à ce que le patient ressente le stimulus et le manifeste aussitôt. Une comparaison doit être faite avec des dents témoins comme pour les autres tests de sensibilité. Des valeurs de normalité correspondant à chaque type de dents sont déterminées par les fabricants (Weine, 2004 ; Lin et Chandler, 2008 ; Abd-Elmeguid et Yu, 2009b ; pour revue voir Gopikrishna et coll., 2009).

#### **2.2.5.3.2 Principe**

Le test électrique est connu depuis 1867. Ce test est décrit dans la littérature comme simple et fiable. Le mécanisme de stimulation se fait par voie directe. Seules les fibres myélinisées sont capables d'être activées par un test électrique (Weine, 2004 ; Lin et Chandler, 2008).

#### **2.2.5.3.3 Réponses**

Une dent à pulpe vivante répond positivement au test électrique avec des valeurs comprises dans la fourchette indiquée par le fabricant. Une dent présentant une inflammation pulpaire irréversible nécessite une intensité de courant moins élevée que la normale pour être stimulée. Une dent à pulpe nécrosée ou en voie de dégénérescence nécessite au contraire une intensité de courant électrique plus importante pour être stimulée. En cas de nécrose pulpaire, la pulpe peut ne répondre à aucun stimulus électrique quelle qu'en soit l'intensité.

Le test électrique permet d'obtenir une valeur spécifique et reproductible du seuil de réaction d'une dent. Cette valeur peut être utilisée dans un but comparatif dans le temps sur une même dent, ou sur des dents différentes. Le test électrique est très intéressant dans le suivi

à long terme des traumatismes dentaires car les résultats sont quantifiés par des valeurs numériques (Weine, 2004 ; Lin et Chandler, 2008 ; Abd-Elmeguid et Yu, 2009b).

#### **2.2.5.3.4**      *Limites*

Il apparaît que des faux positifs peuvent être retrouvés du fait de :

- la possibilité de diffusion du courant aux tissus parodontaux par des fêlures, des fractures, des reconstitutions métalliques volumineuses...,
- la persistance de fibres nerveuses fonctionnelles dans une pulpe en voie de dégénérescence,
- la conduction électrique par la salive et par les électrolytes : le test électrique exige un champ opératoire complètement sec, la présence de salive peut donc fausser les résultats.

Les faux négatifs sont observés :

- chez les jeunes patients, pour qui le processus de myélinisation des fibres nerveuses est tardif : la réponse de la dent permanente en cours d'évolution dépend du degré de développement radiculaire,
- sur les dents traumatisées du fait de la sidération pulpaire au moment du choc,
- sur les dents présentant une épaisseur importante de dentine réactionnelle.

Par ailleurs, les phénomènes d'adaptation et d'accommodation rendent difficiles un nouveau test dans les minutes qui suivent la stimulation initiale (Myers, 1998 ; Nam et coll., 2005a ; Nam et coll., 2005b ; Lin et Chandler, 2008 ; Gopikrishna et coll., 2009).

En résumé, l'analyse de la douleur décrite par le patient, l'observation clinique et les tests de sensibilité (froid, chaud, électrique) sont destinés à affiner le diagnostic de la vitalité pulpaire. Mais d'autres tests peuvent être pratiqués pour aider le praticien à évaluer la présence d'une pulpe vivante ou d'une pulpe nécrosée.

## **2.2.6 LES AUTRES TESTS**

Parmi, les autres tests pouvant participer au diagnostic de la vitalité pulpaire, sont décrits les tests de percussion, le test de morsure, le test d'anesthésie et le test de cavité.

### **2.2.6.1 Tests de percussion**

Les tests de percussion s'effectue en percutant délicatement les dents témoins et les dents à tester avec le manche du miroir dans le sens vertical puis dans le sens transversal (succussion).

Le test de percussion vertical permet de détecter une inflammation desmodontale en stimulant les terminaisons proprioceptives et nociceptives périodontales. Cette inflammation desmodontale peut avoir une origine bactérienne (endodontique, parodontale ou traumatisme dentaire) ou une origine non bactérienne (interférence occlusale ou traitement iatrogène). Une réponse positive à ce test signifie uniquement que les tissus parodontaux souffrent. En général, une dent avec une atteinte parodontale est plus sensible à la percussion verticale qu'une dent saine, même si une dent saine peut parfois présenter une réponse positive à ce test. En effet, des dents à pulpe vitale peuvent être très sensibles en cas de rhume, de sinusite, de traitement orthodontique ou de traumatismes dentaires tels que les fêlures, les fractures alvéolaires ou radiculaires, les luxations et les subluxations.

Une percussion transversale douloureuse peut aussi être le signe d'une pulpite alors que des dents nécrosées ne réagissent pas aux tests de percussion si l'infection demeure confinée à l'endodonte.

Il est important de répéter les tests de percussion sur plusieurs dents sans ordre déterminé afin d'apprécier la constance des observations. Les résultats doivent systématiquement être comparés à ceux des dents adjacentes et antagonistes afin de permettre au patient de différencier une réponse normale d'une réponse qui signe une souffrance desmodontale (Weine, 2004 ; Torabinejad et Walton, 2008).

### **2.2.6.2 Test de morsure**

Le test de morsure s'avère très utile en cas de fêlure dentaire. En effet, lorsqu'une dent est fêlée, le patient se plaint d'une douleur brève et vive au moment de l'occlusion et au moment du relâchement alors que la douleur disparaît quand les dents sont maintenues serrées sur une baguette de bois ou un rouleau de coton (Weine, 2004).

### **2.2.6.3 Test d'anesthésie**

Une anesthésie sélective peut être utile quand aucun autre test n'a pu mettre en évidence la dent causale. L'anesthésie intra-ligamentaire est alors conseillée. Elle s'effectue dent par dent en commençant par la dent la plus antérieure (Weine, 2004).

### **2.2.6.4 Tests de cavité**

Il peut arriver, sur des dents présentant une atteinte carieuse importante, qu'aucun des tests évoqués jusqu'à présent ne s'avère concluant. Le praticien peut dans ce cas débiter le curetage de la lésion sans anesthésie. Une douleur vive et soudaine traduit la vitalité de la pulpe dentaire. Une absence de réaction traduit une nécrose pulpaire si le curetage va jusqu'à l'effraction pulpaire. Ce test s'avère pertinent sur des dents présentant une lésion carieuse, mais il ne peut être utilisé sur une dent indemne de lésion carieuse sur laquelle il y a un doute quand à la vitalité pulpaire (Weine, 2004).

Certains tests sont utiles au diagnostic de la vitalité pulpaire mais ils ne sont pas toujours assez précis pour permettre d'établir un diagnostic définitif. Il est nécessaire d'effectuer un examen radiographique des dents testées. Les résultats de la radiographie seront alors corrélés à l'examen clinique et à l'ensemble des tests accomplis.

## 2.2.7 L'EXAMEN RADIOGRAPHIQUE : APPORTS ET LIMITES

L'examen radiographique de choix dans l'« évaluation » de la vitalité pulpaire est la radiographie rétro-alvéolaire car elle est plus précise. La technique des plans parallèles en incidence orthogonale doit être privilégiée et au besoin complétée par des incidences excentrées, mésialement (règle de Clark) ou distalement (règle de Walton). Il est avantageux d'utiliser un angulateur pour placer le film radiographique parallèlement à la dent et orienter le faisceau de rayons X perpendiculairement au film. Cette technique permet d'obtenir une image radiographique la plus fidèle possible et d'éviter la superposition des autres structures dentaires et osseuses (Weine, 2004 ; Iannucci et Howerton, 2006).

Des difficultés telles que des variations régionales de la densité minérale, des superpositions des différentes structures osseuses et dentaires peuvent compliquer cette lecture (American Dental Association Council of Medical Affairs, 2006). La radiographie rétroalvéolaire apporte une aide réelle au praticien car elle précise l'importance et la profondeur des pertes de substances coronaires et des éventuelles obturations, l'adaptation marginale de ces dernières, la présence d'un fond de protection, l'existence de défauts dans la structure de l'émail ou la dentine. Elle renseigne sur la proximité pulpaire des lésions et des obturations, sur un éventuel dépôt de dentine réactionnelle. Elle indique le stade d'édification radiculaire en fonction de l'âge du patient. Elle permet l'observation de l'endodonte dans son ensemble, d'une éventuelle résorption interne ou externe, de l'anatomie, de la longueur des racines, du volume du système canalaire, de l'espace ligamentaire et du périapex. Elle montre le stade de la dent temporaire (stade I : stade d'immaturation ; stade II : stade de stabilité ; stade III : stade de résorption). Tous ces éléments doivent être analysés avec attention pour aider au diagnostic de la vitalité pulpaire (Weine, 2004 ; Iannucci et Howerton, 2006). L'attention du praticien doit se porter sur la région apicale de la dent dans le diagnostic de la vitalité pulpaire. Une image radiologique apicale normale est caractérisée par :

- un liseré radioclaire continu et homogène, délimité d'un côté par la racine et de l'autre par la lamina dura de l'alvéole qui correspond à la paroi alvéolaire,
- un os cortical et de l'os alvéolaire présents autour des racines (Weine, 2004).

La radiographie permet ainsi d'affiner un diagnostic, d'affirmer ou d'infirmer les hypothèses diagnostiques, mais elle présente de réelles limites. Elle fournit une image plane de structures en trois dimensions, avec une superposition des éléments. La superposition des racines est aussi une source d'erreur. L'orientation du tube radiologique peut également projeter l'image radioclaire ou radioopaque de structures normales (foramen mentonnier,

foramen nasopalatin, ou fosses nasales) à l'apex des dents voisines. De plus, un délai peut exister avant que des symptômes cliniques ne se manifestent par des signes radiologiques (Pretty et Maupomé, 2004).

En conclusion, la présence d'une image pathologique peut orienter vers le diagnostic d'une nécrose pulpaire (au moins de la racine correspondant à l'image radioclaire) mais l'absence d'image ne permet pas de conclure à l'absence de nécrose pulpaire.

**Les résultats de la radiographie doivent être interprétés avec prudence par le praticien qui tient compte des informations fournies par l'interrogatoire du patient, l'examen clinique, les tests de sensibilité, les tests de percussion et les autres tests qui ont pu être pratiqués. La synthèse de ces informations doit permettre au praticien de poser un diagnostic, qui permet de choisir la thérapeutique la plus adaptée à la situation. Les décisions thérapeutiques de traitements endodontiques sont souvent prises en situation de doute. Une exploration de la vascularisation pulpaire permettrait de différencier les pulpes parfaitement vitales des pulpes pathologiques, qu'il s'agisse d'une inflammation pulpaire irréversible ou d'une nécrose. Il est important de se demander s'il est possible d'étudier la vascularisation sans provoquer de dommages pulpaires. Un moyen diagnostique non invasif pourrait-il être utilisé par les odontologistes ? Avant de tenter de répondre à ces questions, les particularités de la vascularisation pulpaire doivent être précisées.**

### ***2.3 INTERET DE L'ETUDE DE LA VASCULARISATION PULPAIRE DANS LE DIAGNOSTIC DE LA VITALITE PULPAIRE***

#### **2.3.1 VASCULARISATION PULPAIRE**

La vascularisation pulpaire assure une fonction de nutrition des éléments vitaux de la pulpe dentaire en apportant par des artères et artérioles les différents métabolites qui transitent

dans la matrice extracellulaire de la pulpe. Toute altération de la circulation pulpaire joue un rôle fondamental dans le déclenchement de désordre tissulaire (Weine, 2004).

### **2.3.1.1 Caractéristiques de la vascularisation pulpaire**

Les artères pulpaires principales pénètrent dans le canal radiculaire par le foramen apical. Dans la zone périapicale, les vaisseaux pulpaires sont anastomosés aux vaisseaux parodontaux. Quelques vaisseaux peuvent provenir de foramina secondaires latéraux. Les artères principales donnent des ramifications latérales qui se capillarisent en regard de la zone sous-odontoblastique. Le diamètre de ces artères est inférieur à 100 $\mu$ m. Dans la chambre pulpaire, les artères se ramifient rapidement jusqu'à devenir de fins capillaires très denses dans la zone sous-odontoblastique. Ils peuvent s'insinuer entre les corps cellulaires des odontoblastes, en deçà des jonctions intercellulaires formant un véritable réseau de capillaires fenestrés dont le diamètre varie de 5 à 50 $\mu$ m. Les capillaires forment l'essentiel du réseau vasculaire en raison de l'étendue de la surface d'échanges qu'ils représentent (Fig. 16) (Farges et Magloire, 2001 ; Weine, 2004 ; Nanci, 2007).



**Figure 16 : Vascularisation terminale pulpaire (coupe histologique décalcifiée colorée, microscopie photonique).**

Les veines font suite aux capillaires. Ces veines post-capillaires se regroupent pour former des veines collectrices dans la partie centrale du canal radiculaire, au voisinage des artères. Le retour veineux se fait par le foramen apical (Farges et Magloire, 2001 ; Weine, 2004).

Il existe également un réseau lymphatique dans la pulpe dentaire. Les vaisseaux lymphatiques naissent en périphérie de la chambre pulpaire au niveau du réseau sous-odontoblastique et convergent vers la partie centrale, où ils confluent en vaisseaux plus larges. Ils sortent de la pulpe par le foramen apical avant de s'anastomoser avec les vaisseaux lymphatiques parodontaux. Le drainage lymphatique s'effectue vers les ganglions sous-mentonniers et sous-mandibulaires, puis au niveau des ganglions cervicaux (Farges et Magloire, 2001 ; Nanci, 2007).

Des anastomoses artérioveineuses peuvent se mettre en place lors d'une pathologie pulpaire pour court-circuiter localement une partie du réseau capillaire. Elles constituent une structure d'adaptation permettant de réguler le débit sanguin par augmentation ou diminution du flux sanguin et d'éviter la propagation d'une infection à l'ensemble du tissu, de telle sorte qu'une zone saine et une zone pathologique puissent coexister au sein d'une même pulpe (Farges et Magloire, 2001 ; Weine, 2004 ; Nanci, 2007).

Les caractéristiques de la vascularisation pulpaire étant précisées, voyons comment cette dernière se comporte en cas d'agression à travers l'étude de la physiologie vasculaire.

### **2.3.1.2 Physiologie vasculaire**

Du fait que la pulpe est enfermée dans une cavité dont les parois minéralisées sont hermétiques à tout apport vasculaire périphérique, la vascularisation pulpaire se comporte comme une unité microcirculatoire autonome. Elle conditionne la vitalité du complexe dentino-pulpaire en apportant au tissu pulpaire les éléments nutritionnels nécessaires au métabolisme (Weine, 2004). La régulation du débit sanguin est assurée par une autorégulation locale et réflexe de la musculature vasculaire (Heyeraas et Kvinnsland, 1992).

Toute altération du débit par augmentation de la pression artérielle ou par spasme veineux a pour résultat une dilatation du système capillaire. La paroi endothéliale peut se rompre en provoquant une microhémorragie. Plus souvent, le filtrage plasmatique à travers la paroi vasculaire augmente sous la pression accrue du débit sanguin. En raison des conditions anatomiques particulières du tissu pulpaire, les éléments de structure de la pulpe se trouvent comprimés par cet excès d'exsudat plasmatique. Ce phénomène et les altérations qui en résultent peuvent être :

- réversibles si l'agression est limitée dans le temps ou si elle est de faible intensité,

- localisés si la présence d'anastomoses artério-veineuses directes permet d'isoler une microzone hyperhémie,
- irréversibles si les agressions sont plus fortes en intensité, en durée ou en étendue (Heyeraas et Kvinnsland, 1992 ; Vreven et Noël, 2001 ; Weine, 2004).

La réaction inflammatoire, évoquée dans le paragraphe concernant les mécanismes de défense pulpaire face à l'agression, conduit à une prolifération de petits vaisseaux sanguins, associée à une vaso-dilatation et à une augmentation de leur perméabilité pour permettre la réponse cellulaire à l'inflammation. Les différents neuropeptides libérés au cours de la réaction inflammatoire affectent la vascularisation. Ils entraînent ainsi des vasodilatations ou des vasoconstrictions : les amines vaso-actives (Histamine, Sérotonine), les prostaglandines (PGE1, PGE2), les kinines sont vasodilatatrices et les composants du complément, les cytokines et les fibrinopeptides sont vasoconstricteurs (Vreven et Noël, 2001). Ces phénomènes conduisent à une diminution du flux sanguin à l'origine de la douleur car les fibres nerveuses A-delta sont très sensibles à l'hypoxie (Abd-Elmeguid et Yu, 2009a).

La vascularisation a tendance à diminuer avec l'âge ; les parois vasculaires deviennent hyperplasiques ou dystrophiques. La vitalité et le potentiel de défense de la pulpe se trouvent ainsi diminués. La pulpe présente des signes de dégénérescence fibreuse et/ou calcique. Il s'agit d'une atrophie avec athérosclérose conjonctive (Vreven et Noël, 2001 ; Nanci, 2007).

**Grâce à la riche vascularisation pulpaire, il devrait être possible d'étudier le flux sanguin pulpaire pour déterminer la présence d'un tissu pulpaire vivant ou au contraire d'un tissu nécrosé.**

### **2.3.2 METHODES EXPERIMENTALES DE DIAGNOSTIC DE LA VITALITE PULPAIRE BASEES SUR L'EXPLORATION DE LA VASCULARISATION PULPAIRE**

Ces méthodes diffèrent des tests décrits dans le chapitre consacré aux moyens diagnostiques de la vitalité pulpaire car elles ont pour objectif de détecter la présence d'un

flux sanguin, seule preuve de la persistance de la vitalité pulpaire. Elles sont encore considérées à ce jour comme expérimentales.

### **2.3.2.1 L'oxymétrie de pouls**

Cette méthode non invasive permet de déterminer la saturation en oxygène des capillaires sanguins, ainsi que la vitesse de pulsation sanguine dans un tissu. Cette technique est peu répandue en odontologie car les résultats peuvent être faussés par un excès de dioxyde de carbone et par les mouvements non contrôlés de la sonde ou du patient. De plus, le matériel n'est pas adapté à la dent (Goho, 1999 ; Radhakrishnan et coll., 2002 ; Samraj et coll., 2003 ; Gopikrishna et coll., 2009).

### **2.3.2.2 La photopléthysmographie**

La photopléthysmographie a pour but de mettre en évidence la présence ou non d'un pouls pulpaire, en enregistrant les éventuelles variations de densité optique lors des pulsations sanguines. La photopléthysmographie n'a pas fait l'objet de nombreuses recherches en raison de la lourdeur du protocole d'utilisation, bien que les premiers résultats aient été encourageants (Ikawa et coll., 1994 ; Brisset, 1999 ; Miwa et coll., 2002 ; Samraj et coll., 2003).

### **2.3.2.3 La sonde de radiation au Xénon**

Une solution comprenant du Xénon<sup>133</sup> est injectée dans le ligament parodontal, puis l'isotope est recherché au niveau coronaire grâce à une sonde. Cette technique ancienne est très peu décrite et étudiée. Elle n'a pas fait l'objet de recherches ultérieures car elle s'est avérée inapplicable en cabinet dentaire (Kim et coll., 1990 ; Himel, 1992).

**En conclusion, l'étude de la vascularisation pulpaire et de la physiologie vasculaire montre l'importance qu'aurait une méthode d'investigation de la vascularisation dans le diagnostic de la vitalité pulpaire.**

**Nous avons évoqué les principes physiques sur lesquels repose la fluxmétrie laser Doppler et les disciplines médicales où elle permet une évaluation précise de la microcirculation sanguine. Nous allons étudier dans la deuxième partie de ce travail si cette méthode peut permettre un diagnostic de la vitalité pulpaire. Après avoir rappelé les résultats obtenus par les différentes équipes travaillant sur la fluxmétrie laser Doppler dans le diagnostic de la vitalité pulpaire, nous présenterons les résultats obtenus au CHU de Nantes avec le Periflux System 5000.**

**DEUXIEME PARTIE.**

**ETUDES EXPERIMENTALES SUR  
L'EVALUATION DE LA VITALITE  
PULPAIRE PAR FLUXMETRIE LASER  
DOPPLER**

# **1 ETAT DES CONNAISSANCES SUR LA FLUXMETRIE LASER DOPPLER DANS LE DIAGNOSTIC DE LA VITALITE PULPAIRE EN ODONTOLOGIE**

L'intérêt que portent les odontologistes à la fluxmétrie laser Doppler date de la fin des années 1980. Ils ont vu en cette technique un moyen prometteur d'obtenir des informations fiables sur l'état de la vascularisation pulpaire et par conséquent, d'être en mesure d'établir, dans l'avenir, un diagnostic de l'état pulpaire précis (Gazelius et coll., 1986 ; Gazelius et coll., 1988 ; Ingolfsson et coll., 1994). Des études préliminaires ont été réalisées à partir de modèles animaux (canines de chats, incisives de rats et incisives de porcs) en raison de leur grande similitude anatomique avec les incisives et canines humaines (Edwall et coll., 1987 ; Vongsavan et Matthews, 1996). Edwall et coll. (1987), ont enregistré les flux sanguins pulpaire de canines de chats et d'incisives de rats avant et après avoir réalisé une stimulation électrique du nerf alvéolaire inférieur. Ils ont constaté une augmentation des valeurs enregistrées par fluxmétrie laser Doppler après stimulation électrique et en ont conclu que si la fluxmétrie laser Doppler enregistrerait des modifications de flux sanguins pulpaire chez l'animal dans des conditions expérimentales, cette technique pourrait être aussi un moyen intéressant d'étudier l'état de la vascularisation pulpaire chez l'homme. Chez le porc, Vongsavan et Matthews (1996) ont réalisé des enregistrements du flux sanguin pulpaire sur dents saines, puis sur ces mêmes dents après exposition pulpaire, après éviction pulpaire et après la mort de l'animal. Ils ont montré ainsi que la fluxmétrie laser Doppler enregistrerait des différences de flux sanguins pulpaire quand les conditions expérimentales variaient, et plus précisément en présence ou absence de vascularisation pulpaire. Ils ont émis l'hypothèse que la fluxmétrie laser Doppler pourrait être utilisable chez l'homme. Ils ont néanmoins insisté sur la difficulté à ne pas enregistrer un signal provenant d'autres tissus que la pulpe et notamment du parodonte. D'autres études ont été menées sur des dents humaines extraites. Du sang humain dilué a été injecté pour simuler la perfusion sanguine (Vongsavan et Matthews, 1993). Par la suite, l'efficacité du laser Doppler dans le diagnostic de la vitalité pulpaire a fait l'objet de nombreux articles en traumatologie dentaire et en chirurgie maxillo-faciale. Les résultats obtenus chez l'homme sont décrits ci-après.

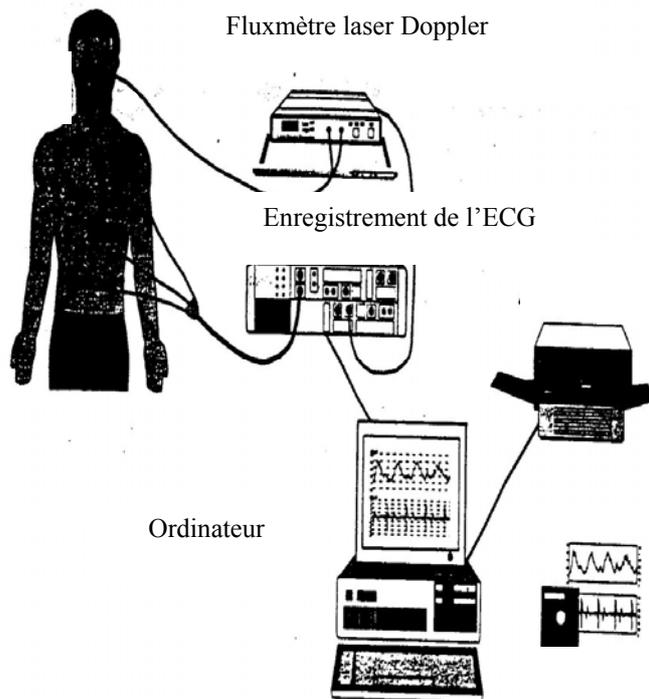
## **1.1 ETUDES SUR DENTS SAINES ANESTHESIEES**

(Gazelius et coll., 1986 ; Musselwhite et coll., 1997)

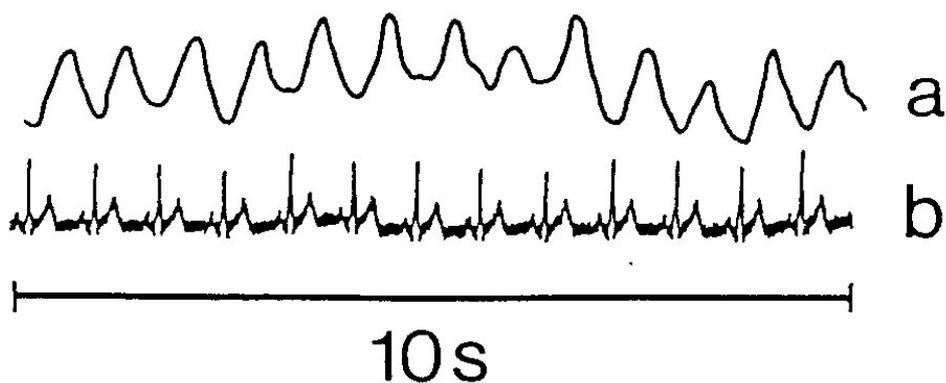
Ces études figurent parmi les premières réalisées chez l'homme. Elles ont eu pour objectif de déterminer si la fluxmétrie laser Doppler permettait d'enregistrer les modifications du flux sanguin pulpaire après infiltration de solution anesthésique avec vasoconstricteur. Des variations du flux sanguin pulpaire ont été observées après injection de solution anesthésique. Gazelius et coll. (1986), Musselwhite et coll. (1997) ont enregistré simultanément aux signaux de flux sanguin pulpaire les données cardiaques du patient à l'aide d'un électrocardiogramme (ECG) et parfois d'un capteur de pouls (Fig. 17). Les enregistrements simultanés de ces données ont permis de déterminer qu'une courbe de flux sanguin enregistrée à partir d'une dent saine était caractérisée par une oscillation régulière synchrone du rythme cardiaque, avec une augmentation rapide, synchrone de la systole cardiaque qui suit immédiatement l'onde R de l'ECG du patient (Fig. 18). Quand d'autres oscillations sont observées, elles correspondent à la contraction des artérioles et des sphincters précapillaires.

Les enregistrements ont montré qu'après injection de solution anesthésique, la valeur numérique du signal enregistré diminuait au bout de 10 minutes, avec une disparition complète des oscillations (Fig 19), puis réaugmentait lentement avec réapparition des oscillations.

Ces premières études ont participé à la description des caractéristiques du signal obtenu lors des enregistrements et des modifications de ces caractéristiques en cas de variation provoquée du flux sanguin pulpaire. Cela a permis d'envisager l'utilisation de la fluxmétrie laser Doppler en pratique clinique courante. Cependant, des difficultés ont été rencontrées dans la stabilisation de la sonde sur la dent et le repositionnement de la sonde. De plus, le patient doit rester parfaitement immobile pour que la technique soit fiable (Gazelius et coll., 1986 ; Musselwhite et coll., 1997).

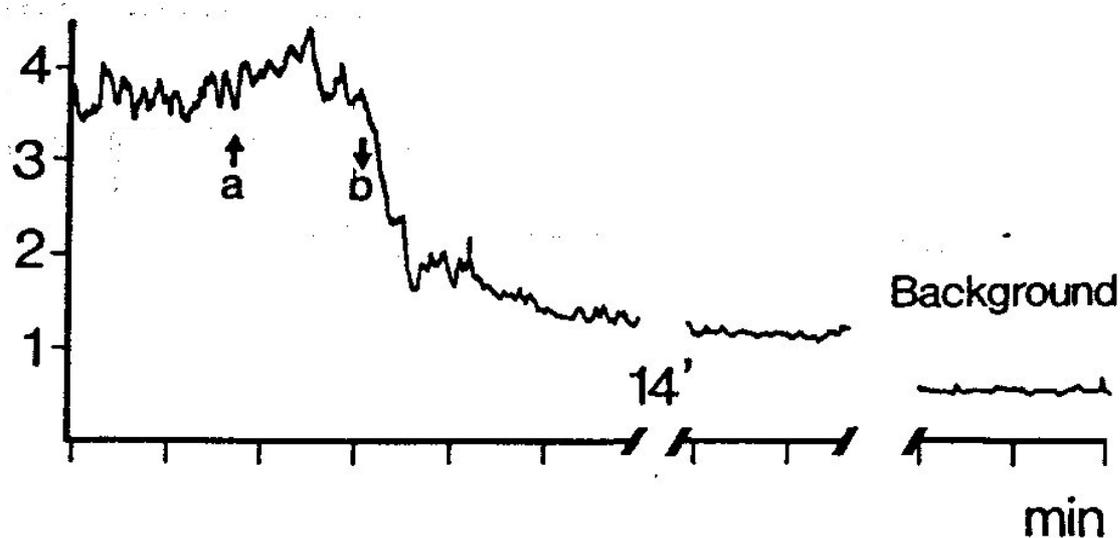


**Figure 17 : Equipement nécessaire aux enregistrements simultanés du flux sanguin pulpaire et de l'ECG (Musselwhite et coll., 1997).**



**Figure 18 : Enregistrement en fluxmétrie laser Doppler réalisé sur une incisive centrale vitale (a) et ECG correspondant (b) (Gazelius et coll., 1986).**

Flux sanguin pulpaire en  
PU (Unités de perfusion)



**Figure 19 : Enregistrement en fluxmétrie laser Doppler réalisé sur une incisive vitale. Une injection d'1 mL de lidocaïne (20mg/mL) additionnée d'adrénaline (12,5µg/L) est réalisée. (a) marque le début de l'injection et (b) la fin de l'injection (Gazelius et coll., 1986).**

L'intérêt de ces études sur des dents humaines anesthésiées a été majeur car elles ont permis de montrer que la fluxmétrie laser Doppler pouvait être indiquée dans l'étude de la vascularisation des dents humaines.

## ***1.2 TESTS DE FLUXMETRIE LASER DOPPLER SUR DENTS VITALES ET SUR DENTS NON VITALES***

(Olgart et coll., 1988 ; Ingolfsson et coll., 1994 ; Evans et coll., 1999)

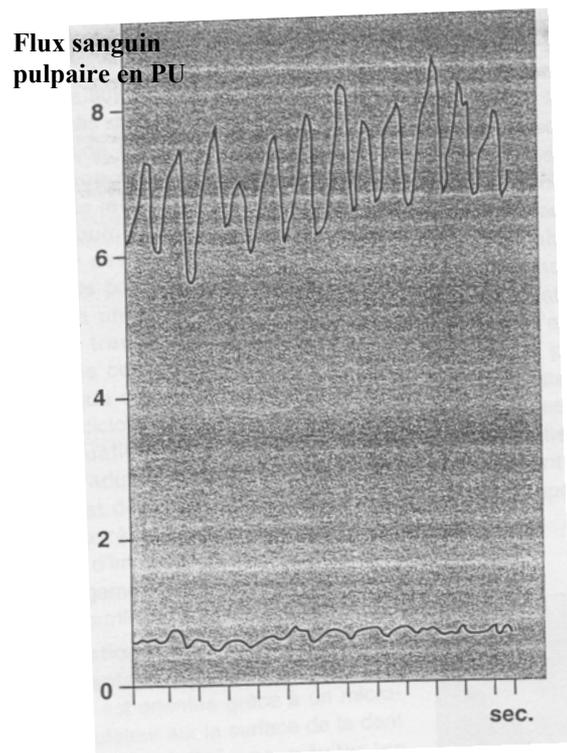
L'objectif de ces études était d'évaluer les capacités de la fluxmétrie laser Doppler à distinguer les dents non vitales des dents vitales.

Olgart et coll. (1988) ont réalisé des enregistrements sur 33 dents ayant subi une luxation plus d'un an avant l'étude et présentant des signes de nécrose (dyschromie, lésion radio-claire

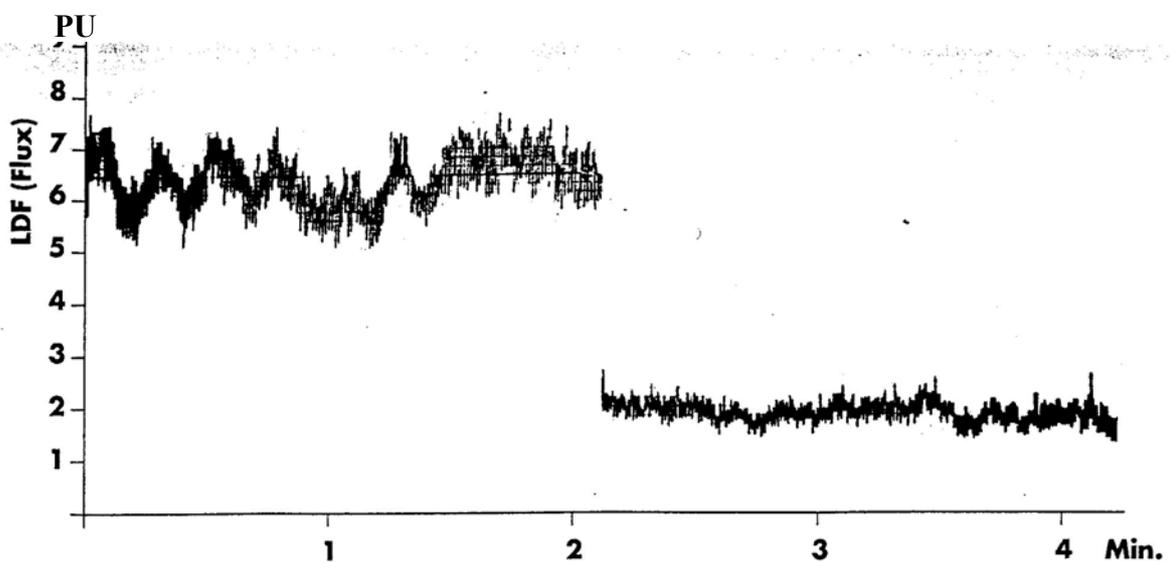
apicale et test électrique négatif). Les tests ont été menés en parallèle sur 33 dents contrôles. Les enregistrements des dents nécrosées ont montré des valeurs numériques en PU inférieures à celles des dents témoins lors des enregistrements (exemple présenté Fig. 20) (pour rappel, la fluxmétrie laser Doppler enregistre les valeurs du flux sanguin exprimées en PU). De plus, l'absence d'oscillations synchrones du rythme cardiaque a été constatée sur 29 des dents nécrosées alors que les dents témoins présentaient des enregistrements synchronisés avec le rythme cardiaque.

Evans et coll. (1999) ont comparé la fluxmétrie laser Doppler avec les tests conventionnels (test au froid et test électrique) en réalisant une étude sur 84 dents vitales et 67 dents non vitales présentant des traitements endodontiques. Ces travaux ont permis de montrer qu'avec les tests conventionnels certaines dents vitales ne répondaient pas positivement et qu'un grand nombre de dents non vitales étaient détectées comme vitales. En revanche, la fluxmétrie laser Doppler a permis une discrimination fiable entre dents vitales et dents non vitales.

Ces études, comme celles d'Ingolfsson et coll. (1994) et de Fratkin et coll. (1999) qui ont réalisé des tests sous anesthésie générale sur des dents temporaires dont la nécrose était cliniquement prouvée (coloration, mobilité, image radiologique), ont montré que le signal enregistré sur une dent à pulpe nécrosée est différent de celui provenant d'une dent à pulpe vitale (Fig. 20 et 21). L'ensemble de ces études a montré que la fluxmétrie laser Doppler permettait d'obtenir des résultats plus fiables que les tests de sensibilité conventionnels. Cependant, les auteurs ont souligné des difficultés d'analyse des résultats de certaines dents présentant des lésions péri-apicales ou des calcifications pulpaires.



**Figure 20 : Enregistrement en fluxmétrie laser Doppler d'une dent vitale (courbe supérieure) et d'une dent nécrosée (courbe inférieure) (Olgart et coll., 1988).**



**Figure 21 : Enregistrement en fluxmétrie laser Doppler d'une dent vitale (courbe gauche) et d'une dent nécrosée (courbe droite) (Ingolfsson et coll., 1994).**

**Ces études ont montré l'intérêt de la fluxmétrie laser Doppler pour diagnostiquer des dents vitales ou non vitales dans des conditions expérimentales. La fluxmétrie laser Doppler a ensuite été expérimentée dans des situations cliniques dont les diagnostics ne sont pas connus à l'avance, afin d'étudier si la fluxmétrie laser Doppler pouvait être considérée comme un moyen diagnostique à part entière en pratique clinique.**

### ***1.3 APPOINT DE LA FLUXMETRIE LASER DOPPLER EN CHIRURGIE MAXILLO-FACIALE***

(Emshoff et coll., 2000a ; Emshoff et coll., 2000b ; Ozurk et coll., 2003 ; Sato et coll., 2003 ; Harada et coll., 2004)

La préservation de la vitalité des segments dento-alvéolaires mobilisés pendant les interventions d'ostéotomies nécessite le maintien d'un réseau vasculaire de qualité. Si ce dernier est altéré, des complications peuvent apparaître. Les travaux réalisés en chirurgie maxillo-faciale ont eu pour objectif d'étudier les valeurs de flux sanguin exprimées en PU après l'intervention, en comparaison avec l'examen préopératoire. Ces études ont mis en évidence l'existence d'épisodes ischémiques pulpaire au niveau des fragments déplacés durant les jours qui suivent l'intervention chirurgicale. La fluxmétrie laser Doppler a aussi aidé à la détection précoce des patients à risque de complications (nécroses aseptiques plus ou moins étendues). Cette technique a permis de comparer l'effet de différentes techniques chirurgicales sur les flux sanguins pulpaire. Ces études ont permis de considérer la fluxmétrie laser Doppler comme une méthode de diagnostic fiable.

#### **1.4 ENREGISTREMENTS DES FLUX SANGUINS PULPAIRES DE DENTS TRAUMATISEES**

Le diagnostic de la vitalité pulpaire des dents traumatisées est difficile. En effet, nous avons déjà insisté sur le fait que les tests de sensibilité conventionnels évaluent exclusivement la réponse sensorielle de la pulpe à une stimulation et non l'état de la vascularisation pulpaire. Il faut savoir qu'une dent traumatisée peut rester insensible à ces tests pendant une longue période sans pour autant être nécrosée. Cependant, un mauvais diagnostic de la vitalité pulpaire conduit à un traitement inapproprié. Seule l'évaluation du flux sanguin pulpaire pourrait donner une meilleure estimation de la vitalité pulpaire dans le suivi du traumatisme à long terme et éviterait des thérapeutiques inadéquates.

Des enregistrements en fluxmétrie laser Doppler d'incisives centrales maxillaires luxées chez des enfants ou des adolescents âgés de 8 à 17 ans (Heithersay et Hirsch, 1993 ; Mesaros et Trope, 1997 ; Lee et coll., 2001), d'incisives mandibulaires chez un jeune patient de 11 ans (Gazelius et coll., 1988) ou de dents présentant une fracture radiculaire transversale chez un patient de 17 ans (Ebihara et coll., 1996) ont prouvé l'intérêt de la fluxmétrie laser Doppler dans le suivi des dents traumatisées. En effet, les dents traumatisées qui ont évolué de manière favorable ont produit des signaux fluxmétriques caractéristiques de dents vitales dans des délais plus courts que les tests de sensibilité conventionnels (Fig. 22).

	Fluxmétrie laser Doppler	Test au froid	Test électrique
Gazelius et coll., 1988	6 semaines	Non effectué	9 mois
Heithersay et Hirsch, 1993	10 semaines	15 semaines	15 semaines
Ebihara et coll., 1996	2 mois	19 mois	12 mois
Mesaros et Trope, 1997	76 jours	118 jours	Non effectué
Lee et coll., 2001	3 mois	6 mois	Non effectué

**Figure 22 : Temps écoulé après le traumatisme dans différentes études avant d'obtenir une réponse positive aux différents tests effectués.**

Toutes ces études ont montré que la fluxmétrie laser Doppler pouvait détecter la circulation sanguine d'une dent traumatisée et distinguer une dent à pulpe vitale d'une dent à pulpe nécrosée. Heithersay et Hirsch (1993) ont cependant précisé que les résultats enregistrés n'étaient pas reproductibles sur une même dent testée.

De plus, des études ont été menées sur des groupes de patients présentant des luxations ou subluxations et des dents réimplantées après expulsions (Olgart et coll., 1988 ; Emshoff et coll., 2004a ; Emshoff et coll., 2004b ; Strobl et coll., 2004). Cependant, les résultats des enregistrements en fluxmétrie laser Doppler sont exprimés sous la forme d'une moyenne, c'est-à-dire que cette moyenne est calculée à partir des résultats obtenus pour toutes les dents enregistrées au même temps après la survenue du traumatisme.

L'étude d'Olgart et coll. (1988) a inclus 18 patients, ce qui a permis de tester 20 dents luxées ou subluxées. Aucune dent ne répondait au test électrique immédiatement après le traumatisme dentaire. Des enregistrements en fluxmétrie laser Doppler ont été réalisés dans le cadre du suivi des patients jusqu'à ce que les tests électriques soient positifs. Les auteurs ont montré une grande précision de la fluxmétrie laser Doppler dans la distinction des dents nécrosées par rapport aux dents vitales.

Emshoff et coll. (2004a et 2004b) ont mené deux études portant sur des échantillons de 51 dents luxées et de 13 dents expulsées. Ils ont démontré que la fluxmétrie laser Doppler permettait de rendre compte plus précocément que les tests de sensibilité conventionnels de la vitalité ou de la nécrose d'une dent.

L'équipe de Strobl (2004) est arrivée à des conclusions semblables après avoir réalisé des enregistrements sur 18 incisives maxillaires luxées. Elle a néanmoins mis l'accent sur les difficultés techniques de mise en œuvre de la fluxmétrie laser Doppler : le maintien de la sonde, la position de la sonde sur les dents, l'isolement du parodonte, le degré de minéralisation de l'émail et de la dentine.

Les études sur des groupes de patients démontrent l'utilité de la fluxmétrie laser Doppler dans le suivi des dents traumatisées qui ne répondent pas aux tests de sensibilité conventionnels. En effet, pour ces auteurs, le retour à une vascularisation normale après un traumatisme dentaire est beaucoup plus rapide que la récupération de la sensibilité, ce qui permet de décider de différer ou de pratiquer le traitement endodontique dans des délais plus courts et donne la possibilité d'éviter les complications cliniques dues à l'absence de traitement d'une dent nécrosée (Olgart et coll., 1988 ; Emshoff et coll., 2004a ; Emshoff et coll., 2004b ; Strobl et coll., 2004).

Cette revue de la littérature montre que la fluxmétrie laser Doppler est considérée comme une méthode d'avenir dans le diagnostic de la vitalité pulpaire notamment en traumatologie dentaire. Cependant, l'expérience clinique en odontologie pédiatrique nous permet d'émettre des réserves quand à l'utilisation de la fluxmétrie laser Doppler en pratique clinique courante. En effet dans la plupart des études décrites précédemment, l'enregistrement nécessite l'absence de mouvement du patient, une température constante de la salle d'examen et un repositionnement de la sonde parfaitement identique à chaque enregistrement (Emshoff et coll., 2004a ; Emshoff et coll., 2004b ; Strobl et coll., 2004). De même, l'absence de dyschromie est un critère important à prendre en compte car, pour une bonne interprétation des résultats, le rayonnement laser doit pénétrer les tissus minéralisés sans rencontrer d'interférence générée par la présence d'hématies en voie de dégradation dans les tubuli dentinaires (Heithersay et Hirsch, 1993).

Après le Periflux 4000 utilisé dans les études précédentes, le fabricant Perimed a mis au point un fluxmètre laser Doppler de nouvelle génération, le Periflux 5000, avec un dispositif de fixation de la sonde optique fourni, pour une utilisation en pratique clinique courante. La première partie de notre travail de thèse a été d'effectuer des tests pour s'assurer de la possibilité d'utiliser le Periflux 5000 en pratique clinique courante. Dans une deuxième phase, nous avons étudié l'intérêt de cette méthode de diagnostic en traumatologie dentaire.

## 2 MATERIELS ET METHODES

### 2.1 FLUXMETRE LASER DOPPLER

#### 2.1.1 DESCRIPTION

Le fluxmètre laser Doppler utilisé au Pôle Odontologie du CHU de Nantes est le système de dernière génération proposé par Perimed, le Periflux System 5000 (PERIMED, Suède) (Fig. 23).

- L'unité principale, PF 5010 LDPM unit (Laser Doppler Perfusion Monitor), est un module de 30cm sur 32cm, et 10,5cm de hauteur, contenant un laser diode émettant à une longueur d'onde de 780nm pour une puissance de 1mW. Cette unité est reliée à un ordinateur, sur lequel est installé le logiciel de traitement des données (Perisoft) fourni par le fabricant.

L'écran digital affiche les données en Unités de Perfusion (PU).



**Figure 23 : Unité principale du fluxmètre laser Doppler : Periflux System 5000 (PERIMED, Suède).**

- La sonde optique est un modèle 407-2 de Perimed, d'1mm de diamètre. Il s'agit d'un long tube flexible renforcé, contenant trois fibres optiques (une fibre émettrice, deux fibres réceptrices) de 125µm de diamètre chacune, disposées en triangle et espacées de 250µm (Fig. 24). Une extrémité est reliée à l'unité principale, l'autre extrémité métallique sur quelques millimètres, est insérée dans un porte-sonde (PH 07-6 PERIMED, Suède).



**Figure 24 : Extrémité métallique de la sonde optique : modèle 407-2 (PERIMED, Suède).**

- Le traitement informatique des données : l'écran de l'ordinateur permet de visualiser en temps réel l'enregistrement du flux sanguin pulpaire. Le logiciel Perisoft compresse la durée totale de l'enregistrement et traite plus de 6000 données correspondant à 3 minutes d'enregistrement pour indiquer la valeur moyenne du flux sanguin pulpaire exprimée en PU ainsi que d'autres valeurs présentant un intérêt statistique (déviation standard, erreur standard, valeur minimale, valeur maximale...).

### **2.1.2 CALIBRAGE**

Un calibrage est effectué systématiquement avant toute utilisation du PeriFlux System 5000. Il s'effectue au moyen d'une solution de calibrage et d'un disque de calibrage.

- La solution de calibrage fournie par le fabricant (Perimed Motility Standard) contient des microparticules de latex en suspension, agitées par mouvement brownien, dont le flux correspond à la valeur 250 ( $\pm 15$ ) PU.

La sonde optique est placée dans cette solution (Fig. 25), puis l'unité principale est mise en position de calibration (Fig. 26).



**Figure 25 : Solution de calibration du fluxmètre laser Doppler.**



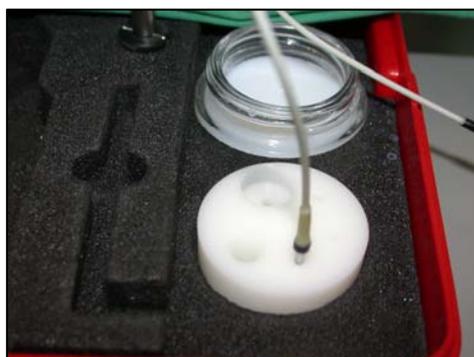
**Figure 26 : Calibration en cours (affichage de l'unité principale).**

A la fin de cette étape, l'affichage doit être le plus proche possible de 250PU (+/- 15) (Fig. 27).



**Figure 27 : Fin de la procédure de calibrage. La valeur de la solution fournie par PERIMED est de 250 ( $\pm 15$ ) PU.**

- Le disque de calibrage (zeroing disc) permet uniquement le contrôle de la valeur « 0 » ( $\pm 0,5$ ) à l'aide d'un support prévu à cet effet (Fig. 28 et 29). La sonde optique est placée dans ce support, dans un pertuis adapté à son diamètre.



**Figure 28 : Support destiné à vérifier la valeur « 0 ».**



**Figure 29 : Fin de calibrage : la valeur « 0 » ( $\pm 0,5$ ) est contrôlée.**

## **2.2 CONDITIONS D'ENREGISTREMENTS**

Les premières séries de tests de fluxmétrie laser Doppler ont été effectuées au Pôle Odontologie du CHU de Nantes sur des étudiants en Odontologie en bon état de santé général et dentaire. Leur consentement libre et éclairé a été recueilli.

Les données ont été enregistrées pendant 3 minutes conformément aux recommandations du fabricant.

## **2.3 PREPARATION DU PATIENT**

Les enregistrements sont réalisés sur un sujet détendu, en position allongée dans le fauteuil dentaire, au repos depuis au moins les 10 minutes précédant le début de l'enregistrement afin de stabiliser ses constantes vitales. Un contrôle du pouls radial du sujet est effectué afin de vérifier que le sujet est au repos avec un rythme cardiaque normal (60-80 pulsations par minute) avant le début de l'enregistrement. La synchronisation du pouls avec les courbes est vérifiée en cours d'enregistrement.

## 2.4 CHAMP OPERATOIRE

Un champ opératoire (Fig. 30) est mis en place dans le but :

- d'isoler la zone d'enregistrement de la salive,
- de libérer la zone d'enregistrement pour l'opérateur,
- d'isoler la sonde optique des lèvres du patient afin de limiter les mouvements et les enregistrements parasites.

Le champ opératoire est constitué :

- d'un écarteur à photographie,
- de rouleaux de cotons salivaires placés dans le vestibule,
- d'une pompe à salive pour limiter le nombre de déglutitions.

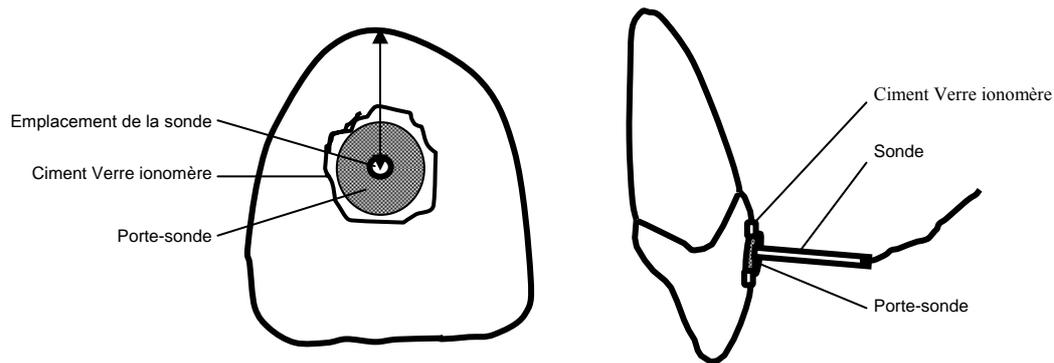


**Figure 30 : Le champ opératoire est constitué d'un écarteur à photographies, de rouleaux de coton salivaires et d'une pompe à salive.**

## 2.5 FIXATION DE LA SONDE

La sonde est fixée à la dent à l'aide d'un porte-sonde (PH 07-6 PERIMED, Suède), de 4mm de diamètre et de 2,5mm de hauteur. Celui-ci est collé au centre de la face vestibulaire de la dent, au niveau des pointes des papilles gingivales, à l'aide d'un Ciment Verre Ionomère

(CVI) Ketac™ Fil Plus (3M, Allemagne) (Fig. 31 et 32), en appliquant le porte-sonde sur la face vestibulaire de la dent et en s'assurant que le CVI ne fuse pas entre le porte-sonde et la dent, à l'endroit où la sonde sera appliquée. Après prise du CVI, la sonde optique peut donc être positionnée à plusieurs reprises dans le porte-sonde et être maintenue sans difficulté pendant les 3 minutes d'enregistrement.



**Figure 31 : Schéma montrant la position de la sonde optique sur une vue vestibulaire et une vue mésiale.**



**Figure 32 : Photographie clinique intrabuccale montrant la sonde optique sur la face vestibulaire d'une 11.**

## **2.6 ANALYSE DES DONNEES**

Le logiciel Perisoft indique les valeurs moyennes des flux sanguins pulpaire enregistrés et les courbes de flux sanguin pulpaire. Les tests statistiques sont effectués à l'aide du logiciel GraphPad Prism Version 4. Une étude comparative a été réalisée en utilisant un test t de Student apparié avec un intervalle de confiance de 95% ( $p < 0,05$ ).

## **3 MISE AU POINT DU PROTOCOLE**

L'objectif de notre travail a été dans un premier temps de tester le dispositif de fixation de la sonde 407-2 de Perimed à l'aide du porte-sonde fourni par le fabricant et d'évaluer son utilisation pratique clinique courante.

### **3.1 TEST PRELIMINAIRE**

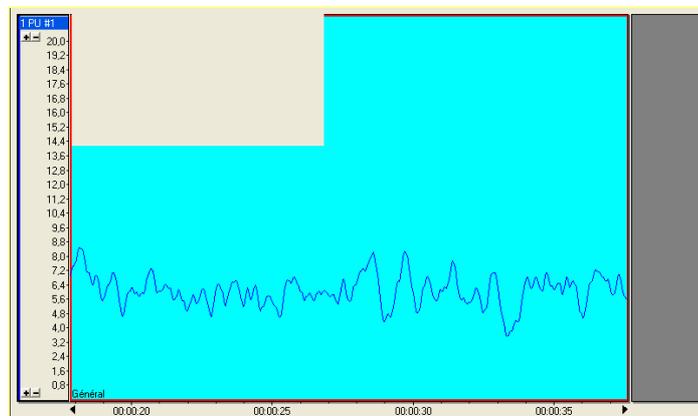
Le test préliminaire a été effectué au Pôle Odontologie du CHU de Nantes chez une étudiante en odontologie, âgée de 25 ans, en bon état de santé général et dentaire.

6 enregistrements ont été réalisés sur son incisive centrale maxillaire droite vitale (11), indemne de restauration et sans antécédent de traumatisme dentaire. Sa vitalité a été vérifiée par un test au froid (Pharmaethyl, Septodont, Saint-Maure-des-Fossés, France) et un test électrique (Analytic Technology, Redmond, WA, USA). Une radiographie rétroalvéolaire en plan parallèle a été réalisée afin de s'assurer que la dent sélectionnée présentait une chambre pulpaire visible et un periapex d'aspect normal.

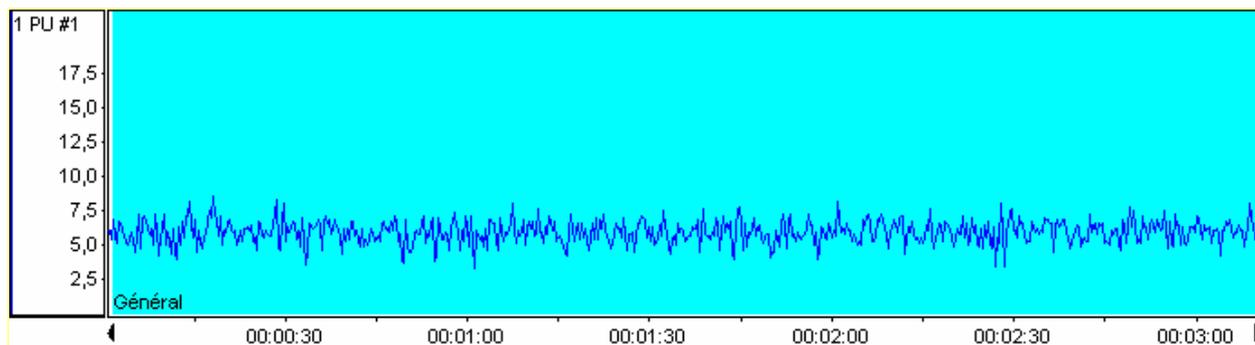
Les données ont été enregistrées pendant 3 minutes conformément aux recommandations du fabricant.

## RESULTATS

Le dispositif de fixation de la sonde décrit dans les « matériels et méthodes » (porte sonde, dans lequel s'insère la sonde, collé à la face vestibulaire de la dent par du CVI) s'est avéré stable. En effet, ce dispositif de fixation a permis de réaliser sans mouvement parasite un enregistrement de la courbe du flux sanguin pulpaire de l'incisive centrale supérieure droite de l'étudiante (Fig. 33). La durée totale de l'enregistrement peut être compressée pour nous permettre de visualiser à l'écran l'ensemble de l'enregistrement (Fig. 34). La courbe obtenue correspond au flux sanguin enregistré en fonction du temps. Ce flux est exprimé en PU. Les courbes montrent des oscillations synchrones au rythme cardiaque, confirmées par la prise du pouls radial. Le logiciel traite ensuite l'ensemble des points enregistrés pour en extraire différentes valeurs, telles que la valeur moyenne du flux sanguin pulpaire, les valeurs minimales et maximales du flux sanguin pulpaire, la déviation standard et la durée de l'enregistrement (Fig. 35).



**Figure 33 : Enregistrement du flux sanguin pulpaire d'une incisive centrale maxillaire droite vitale en temps réel.**



**Figure 34 : Enregistrement du flux sanguin pulpaire présenté Fig. 33 compressé par le logiciel Perisoft.**

Item		1 PU #1
Valeur moyenne	(Unité)	5,93
Déviatiion Standard	(Unité)	0,82
Erreur Standard	(Unité)	0,01
Valeur Maximum	(Unité)	8,79
Valeur cv	(Unité)	2,96
Première valeur	(Unité)	4,97
Dernière valeur	(Unité)	6,44
% variation 1ère vers Dernière valeur	(%)	29,45
Aire sous la courbe	(Unité*sec.)	1116,98
Pente	(Unité/sec.)	0,00
Durée	(sec.)	188,36
Heure de départ relative	(hh:mm:ss,fr)	00:00:01,80
Heure de fin relative	(hh:mm:ss,fr)	00:03:10,21

**Figure 35 : Traitement des données de ce même enregistrement par le logiciel Perisoft (PERIMED, Suède).**

**Le dispositif de fixation de la sonde optique étant mis au point et la prise en main du Periflux System 5000 ayant été effectuée, nous avons entrepris des enregistrements sur un plus grand nombre de dents vitales dans le but de vérifier la reproductibilité des enregistrements.**

### **3.2 ETUDE DES VALEURS DE FLUX SANGUIN PULPAIRE DE DENTS VITALES**

#### **ECHANTILLON**

Les tests de fluxmétrie laser Doppler ont été effectués chez 13 étudiants en Odontologie, âgés de 20 à 25 ans, en bon état de santé générale et dentaire.

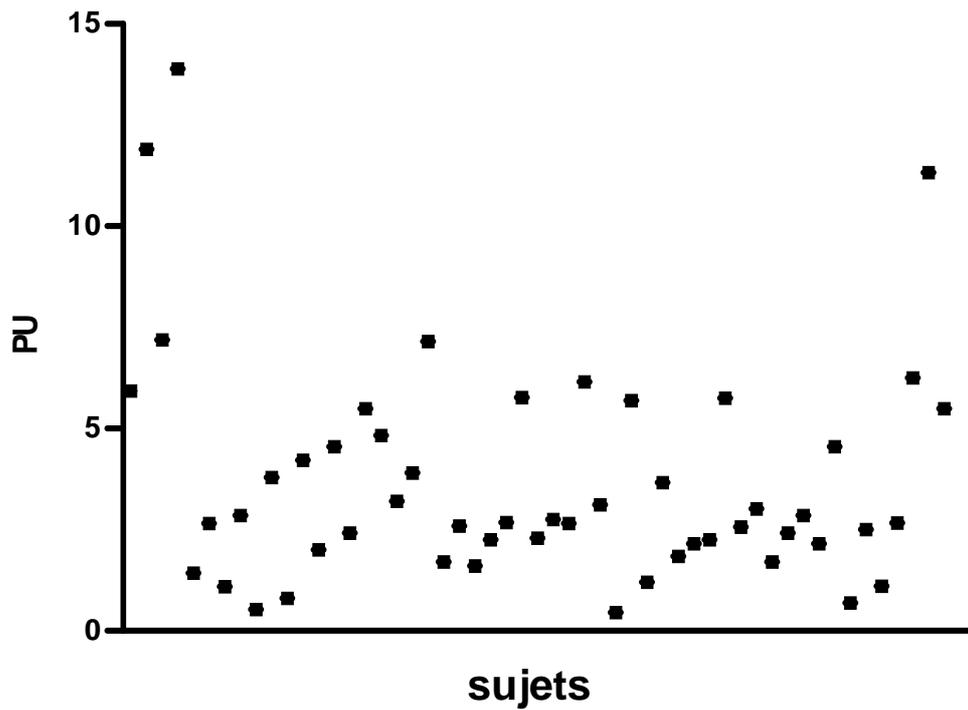
Chez tous ces étudiants, les enregistrements de dents à pulpe vitale (n=52) ont été réalisés sur les 4 incisives maxillaires saines, indemnes de lésion carieuse et de restauration et n'ayant jamais subi de traumatisme. Leur vitalité est contrôlée par un test au froid et un test électrique. Des radiographies rétroalvéolaires sont réalisées comme décrit précédemment.

Toutes les données ont été enregistrées pendant 3 minutes conformément aux recommandations du fabricant.

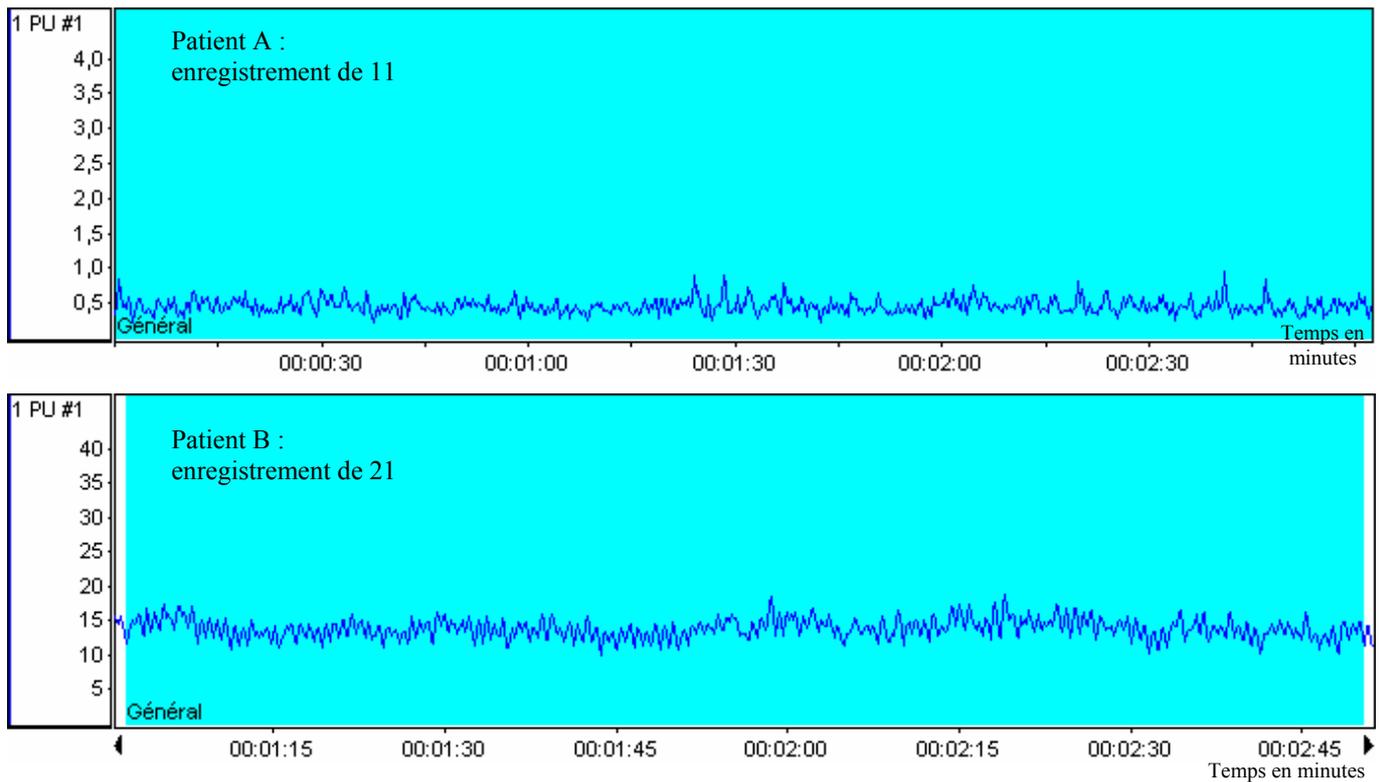
#### **RESULTATS**

Tous les participants à l'étude sont restés immobiles le temps de l'enregistrement et ont jugé la séance de fluxmétrie laser Doppler confortable, non douloureuse mais longue si elle est comparée aux tests de sensibilité couramment utilisés en pratique clinique. Les 52 courbes d'enregistrements du flux sanguin pulpaire des incisives supérieures vitales réalisées chez ces 13 étudiants se sont toutes révélées régulières et synchronisées au rythme cardiaque (pouls radial). Cependant, les valeurs des flux sanguins pulpaire de ces incisives maxillaires vitales (exprimées en PU) se sont avérées hétérogènes en fonction des étudiants (Fig. 36). Les valeurs moyennes s'étendent de 0,46 PU à 13,89 PU, pour une moyenne de 3,69 PU et un écart type de 2,17. Deux exemples d'enregistrement sont représentés dans la figure 37. L'enregistrement de la 11 de l'étudiant A indique un écart de 1,5 entre la valeur de flux sanguin pulpaire (en PU) la plus haute et la valeur la plus basse pour une moyenne de 0,46 PU

et l'enregistrement de la 21 de l'étudiant B indique un écart de 10 environ entre la valeur la plus haute et la valeur plus basse avec une moyenne de 13,89 PU.



**Figure 36 : Enregistrements par fluxmétrie laser Doppler, exprimés en valeurs numériques, des valeurs moyennes des flux sanguins pulpaire d'incisives maxillaires vitales (n=52).**



**Figure 37 : Exemples d’enregistrements compressés de flux sanguin pulpaire de deux incisives maxillaires vitales.**

Les résultats des enregistrements réalisés sur cet échantillon de dents vitales traduisent une grande variabilité inter-individuelle ne permettant pas de définir une valeur de flux sanguin pulpaire (en PU) représentative d’une dent vitale. Nous avons alors décidé de réaliser des tests de reproductibilité afin de déterminer si la technique était fiable dans le temps sur une même dent.

### **3.3 ETUDE DE LA REPRODUCTIBILITE DES VALEURS DE FLUX SANGUIN PULPAIRE**

#### **ECHANTILLON**

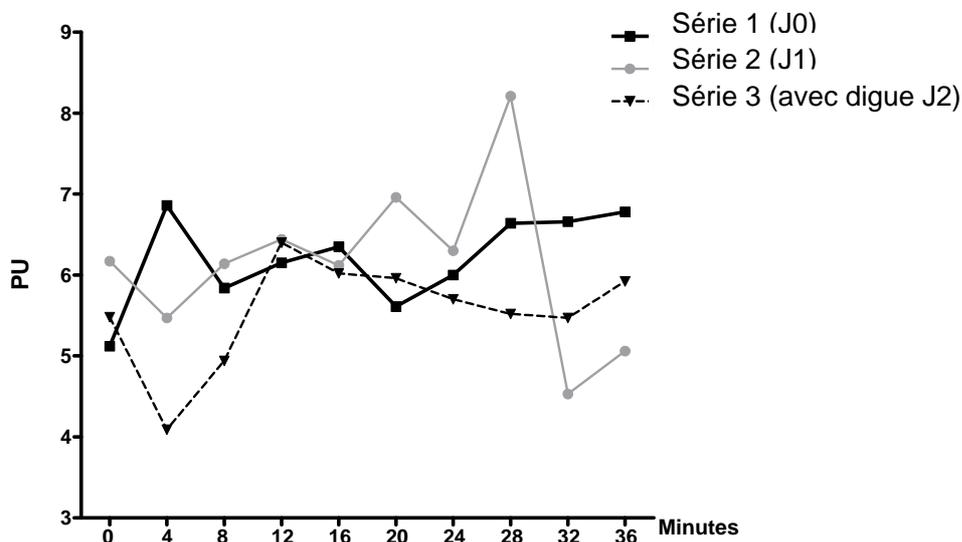
Ces tests de reproductibilité de fluxmétrie laser Doppler ont été effectués chez 2 des étudiants en Odontologie précédemment inclus dans l'étude.

Pour chaque étudiant, les enregistrements ont été réalisés sur l'incisive centrale maxillaire droite vitale. Toutes les données ont été enregistrées pendant 3 minutes conformément aux recommandations du fabricant. Un repos de 1 minute est respecté avant de réaliser un nouvel enregistrement sur la même dent. Pour le premier sujet, les enregistrements ont été effectués à J0 (série 1) et 24 heures plus tard (série 2 à J1). Dans le but de vérifier si les variations observées pouvaient être dues au fait que nous n'avions pas utilisé de digue pour isoler les dents, une nouvelle série de tests a été réalisée 48 heures après la première série avec une digue de couleur verte (Henry Schein, Melville, NY, USA) (série 3 à J2). Pour le second étudiant, seules deux séries ont été enregistrées (série 1 à J0 sans digue et série 2 à J1 avec digue).

#### **RESULTATS**

Chez le premier sujet, les valeurs moyennes de flux sanguin pulpaire relevées après avoir effectué 10 enregistrements ne sont pas reproductibles (Fig. 38 et 39 série 1). Il en est de même pour les séries d'enregistrement pratiquées dans les mêmes conditions le jour suivant, et avec digue (Fig. 38 et 39). L'utilisation de la digue lors des tests avait pour but d'éviter d'enregistrer d'éventuels signaux provenant d'autres tissus que la pulpe dentaire.

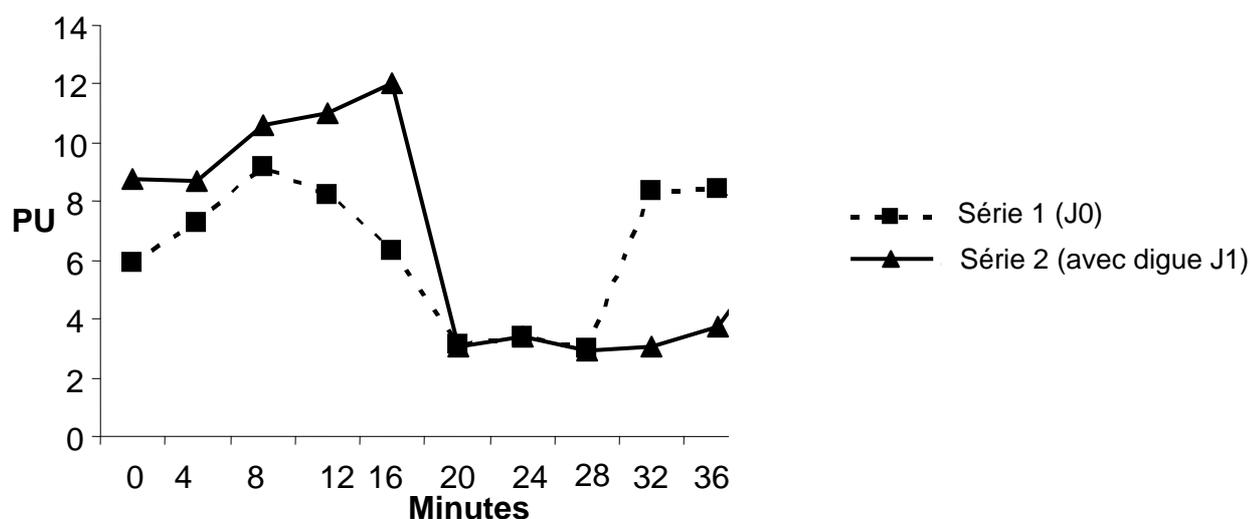
Chez le second étudiant, les valeurs moyennes mesurées avec la digue sont parfois supérieures aux valeurs mesurées sans digue (Fig. 40 et 41) et l'hétérogénéité des valeurs de flux sanguins pulpaire (en PU) enregistrées confirme les résultats observés sur le premier sujet.



**Figure 38 : Séries de 10 enregistrements (exprimés en PU) chez le premier sujet.**

Enregistrement	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Moyenne (en PU)	Ecart type
Série 1 (valeur moyenne du flux sanguin pulpaire exprimé en PU sans digue à J0)	5,12	6,86	5,84	6,15	6,35	5,61	6,00	6,64	6,66	6,78	6,20	0,566
Série 2 (valeur moyenne du flux sanguin pulpaire exprimé en PU sans digue à J1)	6,17	5,47	6,14	6,44	6,12	6,96	6,30	8,21	4,53	5,06	6,14	1,016
Série 3 (valeur moyenne du flux sanguin pulpaire exprimé en PU avec digue à J2)	5,48	4,09	4,94	6,40	6,02	5,96	5,70	5,52	5,47	5,92	5,55	0,649

**Figure 39 : Valeurs numériques relevées par fluxmétrie laser Doppler des trois séries d'enregistrement représentées Fig. 38.**



**Figure 40 : Séries de 10 enregistrements (exprimés en PU) chez le second sujet.**

Enregistrement	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Moyenne (en PU)	Ecart type
Série 1 (valeur moyenne du flux sanguin pulpaire exprimé en PU sans digue à J0)	5,89	7,30	9,17	8,21	6,35	3,14	3,39	2,98	8,38	8,43	6,32	2,389
Série 2 (valeur moyenne du flux sanguin pulpaire exprimé en PU avec digue à J1)	8,78	8,71	10,58	10,98	12,03	3,05	3,38	2,94	3,08	3,75	6,73	3,807

**Figure 41 : Valeurs numériques relevées par fluxmétrie laser Doppler des deux séries d'enregistrement représentées Fig. 40.**

**L'ensemble des résultats obtenus lors de cette première partie du travail montre une grande variation des valeurs du flux sanguin pulpaire (en PU) et l'absence de valeur reproductible. Ceci est contraire aux travaux décrits dans la littérature. Nos résultats peuvent être expliqués par le fait que nous utilisons une nouvelle génération de fluxmètre laser Doppler avec un nouveau logiciel, peut-être plus précis que celui employé précédemment. Cependant, dans les études de Emshoff et coll. (2004a et 2004b) et de Strobl et coll. (2004), il semble que pour obtenir des valeurs reproductibles, les enregistrements doivent être effectués dans des locaux à une température de 21°C. Le Pôle odontologie du CHU de Nantes est constitué de box de soins étroits dont on ne peut maîtriser la température. Nous avons cherché à savoir si un paramètre tel que la température de la pièce lors des enregistrements pouvait influencer nos résultats.**

### **3.4 TESTS DE TEMPERATURE AMBIANTE**

Les tests ont été effectués en relevant les valeurs numériques des tests de calibrage en fonction de la température de la pièce. Le calibrage a été réalisé au moyen de la solution fournie par le fabricant (Perimed Motility Standard) et du disque de calibrage (zeroing disc), qui est un moyen de contrôle du calibrage, comme décrit précédemment. Au cours de ce test, la température initiale de la pièce était de 20°C puis a augmenté jusqu'à 26°C au cours de la séance d'enregistrement. La procédure de calibrage est exécutée toutes les 30 minutes et la température de la pièce est relevée simultanément. L'élévation de la température de la pièce se fait spontanément sans dispositif de chauffage.

## **RESULTATS**

Les enregistrements réalisés à partir de la solution de calibrage montrent des valeurs numériques stabilisées à 250 ( $\pm 15$ ) tout au long de la séance quelle que soit la température de la pièce. La vérification du 0 montre une variation de cette valeur. Les enregistrements réalisés à partir du disque de calibrage montrent que la valeur numérique du « 0 » varie en

fonction de la température de la pièce. Cette valeur est de -3,2 à une température de 20°C et de +9 à une température de 26°C (Fig. 42).

	T0	T0 + 30 min	T0 + 60 min	T0 + 90 min	T0 + 120 min	T0 + 150 min
Température de la pièce	20°C	21°C	23°C	24°C	25°C	26°C
Valeur numérique enregistrée à partir de la solution de calibrage	250 (±15)	250 (±15)	250 (±15)	250 (±15)	250 (±15)	250 (±15)
Valeur numérique enregistrée à partir du disque de calibrage	varie entre -3,2 et -2,9	0 (±0,5)	varie entre 2,5 et 3,5	varie entre 3,7 et 5,1	varie entre 4,5 et 7,2	9

**Figure 42 : Variations, en fonction de l'élévation de la température de la pièce, des valeurs numériques (exprimées en PU) enregistrées toutes les 30 minutes à partir de la solution de calibrage et du disque de calibrage.**

### 3.5 DISCUSSION

Cette étape du travail avait pour objectif de tester la vitalité pulpaire dans un contexte clinique à l'aide du fluxmètre laser Doppler Periflux System 5000. Les enregistrements ont été réalisés sur dents vitales et des tests de reproductibilité ont été pratiqués avec et sans digue.

Certains auteurs enregistrent simultanément les signaux de flux sanguin pulpaire et le rythme cardiaque du patient à l'aide d'un électrocardiographe ou d'un capteur de pouls (Gazelius et coll., 1986 ; Musselwhite et coll., 1997 ; Ozurk et coll., 2003 ; Emshoff et coll., 2004a). Nous n'avons pas utilisé de matériel de ce type et nous nous sommes limités à la prise du pouls radial pour nous assurer que les pics supérieurs des courbes obtenues par les enregistrements étaient bien synchronisés avec les pulsations cardiaques. Ceci pour vérifier

que le Periflux 5000 enregistrerait bien le flux sanguin pulpaire du patient et non des mouvements parasites.

La vitalité pulpaire a été explorée sur des incisives maxillaires saines de jeunes adultes par fluxmétrie laser Doppler. L'examen clinique et l'examen radiographique préalables de ces dents ainsi que les tests de sensibilité conventionnellement employés (test au froid et test électrique) ont permis de s'assurer de leur vitalité. Il s'agissait donc ici de vérifier que le Periflux Système 5000 permettait de diagnostiquer le flux sanguin pulpaire. L'objectif était aussi de savoir s'il était possible de donner avec ce nouveau fluxmètre laser Doppler une valeur de flux sanguin (en PU) caractéristique de chaque dent à pulpe saine. Les enregistrements réalisés sur ces dents à pulpe vitale présentaient une synchronisation des courbes de flux sanguin pulpaire avec le rythme cardiaque. Cela est conforme à la littérature (Ingolfsson et coll., 1994 ; Sasano et coll., 2005). Néanmoins, les valeurs numériques du flux sanguin pulpaire mesurées sur ces incisives maxillaires vitales se sont avérées hétérogènes. L'étude des flux sanguins d'incisives supérieures saines de jeunes adultes a mis en évidence une grande variabilité inter-individuelle ne permettant pas de donner une valeur standard de flux sanguin pulpaire pour chaque dent. Cette hétérogénéité inter-individuelle peut s'expliquer par le fait que le rayonnement laser peut être plus ou moins atténué par des facteurs tels que les antécédents locaux (antécédents de traitements orthodontiques, de traumatismes dentaires éventuellement passés inaperçus et donc non évoqués par les participants à l'étude), les dimensions des dents, l'épaisseur des tissus minéralisés, la teinte des dents (Heithersay et Hirsch, 1993 ; Hartmann et coll., 1996). Il est, par ailleurs, difficile de confronter les résultats de nos enregistrements à ceux des différentes études publiées portant sur des sujets comparables aux nôtres car leurs résultats sont souvent exprimés en pourcentage des valeurs préopératoires (Emshoff et coll., 2000a ; Emshoff et coll., 2000b ; Sato et coll., 2003 ; Harada et coll., 2004).

Dans le but de tester la fluxmétrie laser Doppler comme instrument de suivi de la vitalité pulpaire dans le temps, ce qui permettrait d'exprimer les résultats en pourcentage des valeurs initiales, des tests de reproductibilité ont été réalisés sur deux étudiants. Pour cela, des enregistrements des courbes de flux sanguin pulpaire ont été répétés sur une même dent à 24 heures d'intervalle, avec ou sans digue.

Les tests de reproductibilité effectués chez ces deux étudiants sur des dents à pulpe vitale ont montré de grandes variations de valeurs du flux sanguin pulpaire (pouvant aller du simple au double). Afin de vérifier que ces variations n'étaient pas dues au fait que de nombreux éléments tels que les lèvres, la langue, le ligament alvéolo-dentaire ou la gencive avaient interféré avec l'enregistrement du flux sanguin pulpaire (Vongsavan et Matthews, 1993 ; Soo-Ampon et coll., 2003 ; Polat et coll., 2004 ; Polat et coll., 2005), nous avons répétés les enregistrements avec une digue. En effet, la digue est un moyen décrit dans la littérature pour limiter ce phénomène. Soo-Ampon et coll. (2003) ont ainsi constaté que l'utilisation d'une digue opaque diminue considérablement les valeurs numériques du signal enregistré. Contrairement à la littérature, la digue n'a pas été un filtre optique suffisant dans cette étude pour obtenir des résultats identiques quel que soit le moment de l'enregistrement sur une même dent. Pour expliquer ces résultats, plusieurs éléments doivent être discutés. Une hypothèse peut être avancée si l'on considère que la lumière laser générée par le Periflux Système 5000 diffuse dans l'émail puis la dentine avant de rencontrer les cellules sanguines contenues dans les capillaires de la pulpe et que le trajet de la lumière doit varier à chaque enregistrement. Par ailleurs, le Periflux System 5000 émet à une longueur d'onde de 780nm pour une puissance de 1mW. Cela est conforme aux lasers utilisés dans les études sur le flux sanguin pulpaire dans lesquelles les lasers utilisés sont de faible puissance (de 1 à 3mW), avec une longueur d'onde variant de 632,8nm à 820nm. L'augmentation de la longueur d'onde et de la puissance du laser augmente la profondeur de pénétration de la lumière laser, ce qui produit des signaux plus amples mais majore le risque d'enregistrer des signaux extrapulpaire (pour revue voir Jafarzadeh, 2009). Les fibres optiques de la sonde 407-2 de Perimed sont trois fibres optiques de 125 $\mu$ m de diamètre, espacées de 250 $\mu$ m les unes des autres pour une sonde d'un diamètre de 1mm, ce qui les place dans la fourchette basse des dimensions des fibres classiquement utilisées. En effet, dans la plupart des publications, les sondes optiques ont un diamètre de 1 à 2,8mm avec des fibres optiques de 125 à 200 $\mu$ m de diamètre espacées de 250 à 1500 $\mu$ m. D'après Ingolfsson et coll. (1993), le diamètre de la sonde ou des fibres optiques ne semble pas avoir d'incidence sur les enregistrements, mais l'augmentation de la distance entre les fibres optiques favorise la diffusion de la lumière et induit le risque d'enregistrer des flux sanguins extrapulpaire. Notre dispositif semble donc adapté pour réaliser des enregistrements dans de bonnes conditions ce qui ne permet pas de comprendre les variations des valeurs enregistrées. Certains auteurs se sont intéressés à l'angulation et à la position de la sonde dans la reproductibilité des résultats (Hartmann et coll., 1996 ; Odor et coll., 1996). Ils ont montré que l'angulation de la sonde avait peu d'effet

sur les enregistrements (pour revue voir Jafarzadeh, 2009). La situation de la sonde sur la face vestibulaire de la dent joue, quand à elle, un rôle important (pour revue voir Jafarzadeh, 2009). Une sonde proche du bord incisif risque d'enregistrer un signal faible ; une sonde proche du collet de la dent risque d'enregistrer le flux sanguin gingival. La position de la sonde choisie dans cette étude, à la hauteur des pointes des papilles gingivales, soit à une distance comprise entre 3 et 5mm du collet en fonction des dents et toujours repositionnée au même endroit sur une même dent, est donc un bon compromis. Le fabricant nous a fourni un dispositif de fixation (porte-sonde PH 07-6). Dans les études précédentes, les auteurs n'en disposaient pas. Certains ont utilisé une gouttière en résine autopolymérisable réalisée au laboratoire après prise d'empreintes, puis rebasée au silicone lourd et percée de trous permettant le maintien de la sonde optique (Hartmann et coll., 1996). D'autres ont choisi des gouttières préformées disponibles dans le commerce, rebasées au silicone lourd (Ebihara et coll., 1996), des attelles en plastique type Bioplast® (Emshoff et coll., 2004a ; Strobl et coll., 2004), ou bien des empreintes en silicone perforées (Heithersay et Hirsch, 1993 ; Odor et coll., 1996 ; Mesaros et Trope, 1997 ; Ozurk et coll., 2003). Ces types de dispositifs sont difficiles à mettre en œuvre en pratique courante. Le porte-sonde PH 07-6 est plus simple d'utilisation, limite la présence de salive et évite une déperdition de lumière du fait du contact étroit entre la sonde et la dent. Il serait intéressant de tester les différents dispositifs sur un même sujet pour comparer les résultats obtenus avec chacun.

Les tests de reproductibilité ont mis en évidence une absence de constance des valeurs obtenues lors des enregistrements. Ces constatations compromettent l'intérêt de la fluxmétrie laser Doppler comme instrument de suivi à long terme d'une même dent et sont en contradiction avec les résultats des publications évoquées dans la partie de ce travail consacrée à l'« Etat des connaissances sur la fluxmétrie laser Doppler dans le diagnostic de la vitalité pulpaire en odontologie ». Les auteurs qui arrivent à des conclusions plus positives, en ce qui concerne la fluxmétrie laser Doppler, recommandent de travailler systématiquement dans la même pièce, avec le même fauteuil dentaire dans la même position, à une température de la pièce identique et avec le même praticien pour obtenir des résultats reproductibles (Vongsavan et Matthews, 1993 ; Evans et coll., 1999). Il faut aussi que les patients restent complètement immobiles tout au long de l'enregistrement (Mesaros et Trope, 1997 ; Musselwhite et coll., 1997). Les enregistrements de notre étude ont été effectués dans la même pièce, avec le même fauteuil dentaire systématiquement dans la même position, avec des sujets immobiles et par le même praticien. Mais, il est apparu que la température de la

pièce dans laquelle étaient effectués nos enregistrements variait. Ce paramètre a donc été évalué.

La température de la pièce où ont lieu les enregistrements varie car nous ne disposons pas de la climatisation dans les box de soins du Pôle odontologie du CHU de Nantes. Nous avons supposé que ce facteur non maîtrisable pouvait avoir des répercussions sur nos résultats. Comme nous n'avions pas mesuré la température lors des enregistrements réalisés auparavant, nous avons voulu vérifier en quoi la température de la pièce d'enregistrement pouvait avoir eu un impact sur nos mesures. Le protocole d'enregistrement indiqué par le fabricant implique un calibrage systématique de la valeur 250, à l'aide de la solution fournie. Le calibrage de la valeur 0 est établi automatiquement. En cours de séance, si nous vérifions la valeur 250 à l'aide de la solution, nous constatons qu'elle ne varie pas dans le temps qu'elle que soit la température de la pièce. La vérification de la valeur du « 0 » montre une variation importante au cours de la séance d'enregistrement (-3,2 à +9). L'absence de reproductibilité des valeurs mesurées chez un même sujet est peut-être due aux difficultés de calibration de la valeur « 0 ». En effet, les valeurs de flux sanguins pulpaire enregistrées sont des valeurs très inférieures aux valeurs mesurées lors d'enregistrements cutanés (dizaines ou centaines de PU). En accord avec Jafarsadeh et coll. (2009), il est nécessaire de se demander si la sensibilité de la fluxmétrie Laser Doppler est suffisante dans notre discipline. La valeur numérique enregistrée correspondant au disque de calibrage est stable à 21°C, température recommandée dans les publications (Emshoff et coll., 2004a ; Emshoff et coll., 2004b ; Strobl et coll., 2004) mais les conditions cliniques du Pôle Odontologie du CHU de Nantes, dans lesquelles sont effectués les enregistrements de l'étude, ne permettent pas de maintenir la température de la pièce à 21°C. Cela serait le cas de nombreux cabinets dentaires si la fluxmétrie laser Doppler devait rentrer dans les tests classiques de diagnostic de la vitalité pulpaire.

Il est aussi possible de suggérer que les résultats de nos tests de reproductibilité ne sont pas uniquement liés à la température de la pièce mais aussi aux variations physiologiques inhérentes au tissu mesuré (Fredriksson et coll., 2007). Cela impliquerait que la reproductibilité de l'instrument est bonne mais que des variations intra-individuelles et inter-individuelles des mesures existent. Dans les autres disciplines médicales, il est admis que des erreurs de mesure sont possibles en fluxmétrie laser Doppler. En effet, la position du volume d'exploration n'est connue qu'avec une certaine erreur, qui est elle-même dépendante de l'erreur de mesure de la distance parcourue par le faisceau optique entre la sortie du système

d'émission et les cellules sanguines. Les fluctuations de la vitesse des cellules et le bruit induit par le traitement du signal introduisent même une erreur supplémentaire (Fredriksson et coll., 2007).

**Le fluxmètre laser Doppler Periflux Système 5000 présente des caractéristiques techniques équivalentes aux fluxmètres laser Doppler retrouvés dans la littérature. Le dispositif de fixation mis à disposition par le fabricant a donné satisfaction et il est plus simple que les dispositifs habituellement décrits. Cependant, les enregistrements réalisés ont montré l'existence d'une variabilité intra-individuelle et inter-individuelle dans les mesures du flux sanguin pulpaire sur des dents vitales. L'utilisation de la digue n'a pas apporté de solution. La digue ne sera donc pas employée dans la suite de ce travail. Des facteurs d'erreur sont inévitables en fluxmétrie laser Doppler. La modification de la température de la pièce d'enregistrement fait partie de ces facteurs d'erreurs. Par conséquent, contrairement à ce qui est rapporté dans la littérature, dans des conditions de pratique courante dans les cabinets dentaires, il semble impossible d'utiliser la seule valeur du flux sanguin pulpaire exprimée en PU pour évaluer la vitalité de la pulpe d'une dent.**

**Dans la deuxième partie de ce travail, nous avons testé la fluxmétrie laser Doppler sur des dents présentant une obturation endodontique (dents non vitales) afin d'établir avec le Periflux 5000 une valeur numérique de référence (en PU) pour des dents non vitales ce qui n'a pas été possible pour les dents vitales. La finalité de l'établissement d'une valeur de référence en fluxmétrie laser Doppler pour des dents non vitales serait de diagnostiquer des dents à pulpe nécrosée ou à canal vide.**

#### **4 TESTS COMPARATIFS DE FLUXMETRIE LASER DOPPLER SUR DENTS OBTUREES ET SUR DENTS VITALES**

Nous venons de montrer la variabilité des valeurs de flux sanguin enregistrées sur des dents vitales (non reproductibles chez un même individu et comprises entre 0,46 PU à 13,89 PU selon les étudiants testés). Dans l'idée que la fluxmétrie laser Doppler pourrait néanmoins permettre de distinguer une dent vitale d'une dent non vitale (en complément ou à la place des

tests de sensibilité conventionnels) nous avons voulu comparer les valeurs mesurées chez un même étudiant présentant une incisive centrale vitale et une incisive centrale obturée endodontiquement.

#### **4.1 *ETUDE DE LA REPRODUCTIBILITE DES VALEURS ENREGISTREES SUR UNE MEME DENT NON VITALE***

##### **4.1.1 DENTS TESTEES**

Ces tests de fluxmétrie laser Doppler ont été effectués chez 1 étudiant en Odontologie âgé de 23 ans, en bon état de santé générale et dentaire, non inclus dans l'étude précédente.

Les enregistrements sont réalisés sur 1 incisive centrale maxillaire vitale (11) dent contrôle, indemne de lésion carieuse et de restauration et sur 1 incisive centrale maxillaire non vitale (21), dépulpée à la suite d'un traumatisme dentaire survenu 8 ans auparavant, présentant un traitement endodontique satisfaisant et une obturation coronaire palatine en composite. La vitalité de la 11 a été vérifiée par un test au froid et un test électrique. Une radiographie rétroalvéolaire a été réalisée (Fig. 43).

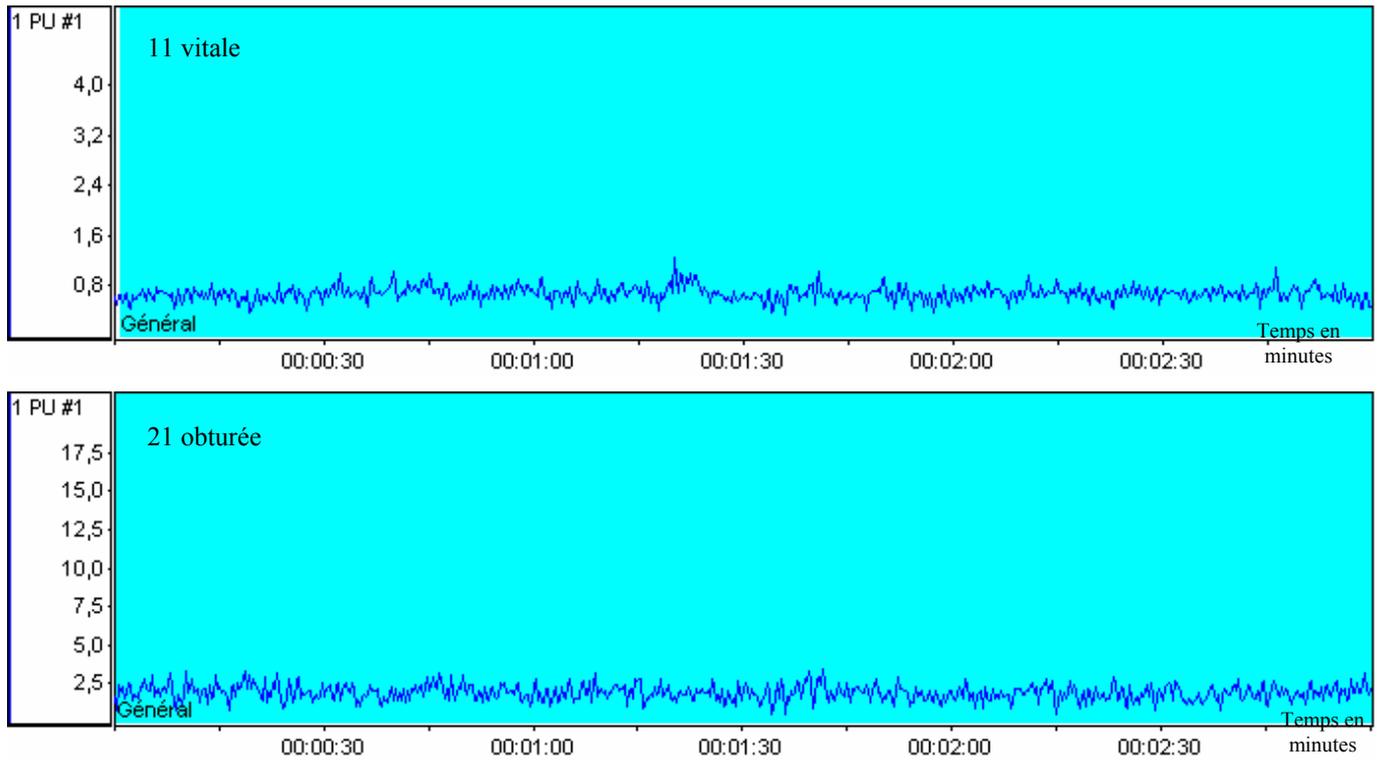


**Figure 43 : Radiographie rétroalvéolaire des incisives de l'étudiant sur lequel les enregistrements ont été réalisés.**

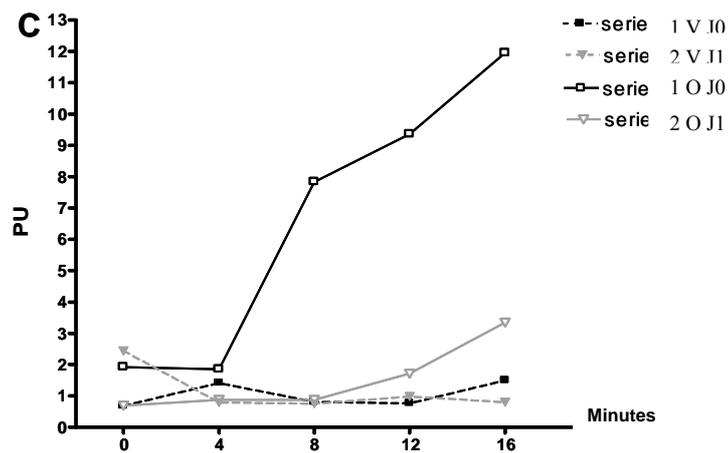
Toutes les données sont enregistrées pendant 3 minutes conformément aux recommandations du fabricant. Un repos de 1 minute est respecté avant de réaliser un nouvel enregistrement sur la même dent comme précédemment décrit.

#### 4.1.2 RESULTATS

Chez l'étudiant participant aux tests, quatre séries de cinq enregistrements ont été réalisées sur une 11 vitale et sur une 21 dépulpée à la suite d'un traumatisme dentaire survenu 8 ans auparavant. Le traitement endodontique de 21 a été réalisé par le praticien traitant, en accord avec les données acquises de la science. Le but des tests était ici de voir si il était possible d'obtenir une valeur en PU différente sur une dent obturée, la fluxmétrie laser Doppler devant normalement servir à distinguer une dent à pulpe vitale d'une dent à pulpe non vitale. 5 enregistrements sur la 11 vitale (dent contrôle), 5 enregistrements sur la 21 dépulpée à J0 et J1 ont été effectués. Nos résultats montrent que les valeurs moyennes mesurées sur la 21 dépulpée sont parfois supérieures (2 enregistrements) aux valeurs relevées sur la 11 qui est vitale (un exemple est donné Fig. 44). Les valeurs moyennes relevées ne sont pas reproductibles aussi bien sur la dent vitale que sur la dent non vitale (Fig. 45 et 46). Cependant, lorsque l'on a pris le pouls radial du patient pour contrôler les courbes d'enregistrement de la 21, il n'y avait pas de synchronisation entre le rythme cardiaque et les enregistrements alors que les courbes d'enregistrement de la 11, vitale, étaient synchronisées par rapport au rythme cardiaque du sujet.



**Figure 44 : Enregistrements du flux sanguin pulpaire d'une dent vitale (11) et d'une dent obturée (21).**



**Figure 45 : Séries de 5 enregistrements (exprimés en valeurs numériques) par fluxmétrie laser Doppler d'une incisive centrale maxillaire vitale (V) et d'une incisive centrale maxillaire obturée (O).**

Enregistrement	1	2	3	4	5	Moyenne (en PU)	Ecart type
Série 1 V (valeur moyenne enregistrée exprimée en PU) à J0	0,68	1,41	0,81	0,76	1,49	5,15	0,387
Série 2 V (valeur moyenne enregistrée exprimée en PU) à J1	2,44	0,79	0,75	0,98	0,80	5,76	0,725
Série 1 O (valeur moyenne enregistrée exprimée en PU) à J0	1,92	1,85	7,83	9,36	11,95	6,58	4,534
Série 2 O (valeur moyenne enregistrée exprimée en PU) à J1	0,69	0,88	0,88	1,71	3,34	1,50	1,102

**Figure 46 : Valeurs numériques relevées par fluxmétrie laser Doppler des séries d'enregistrements représentées Fig. 45.**

**Les tests de reproductibilité réalisés à titre comparatif chez un même étudiant présentant une incisive centrale obturée montrent la même variabilité intra-individuelle que les tests de reproductibilité effectués sur des dents vitales. Nous avons ensuite comparé les valeurs numériques obtenues sur des dents vitales et non vitales dans un groupe de 5 étudiants afin de vérifier que les résultats obtenus n'étaient pas dus à un problème lié au patient et d'essayer de dégager une valeur numérique (en PU) correspondant aux dents non vitales.**

## **4.2 COMPARAISON DES VALEURS ENREGISTREES EN FLUXMETRIE LASER DOPPLER SUR DES DENTS VITALES ET DES DENTS NON VITALES**

### **4.2.1 ECHANTILLON**

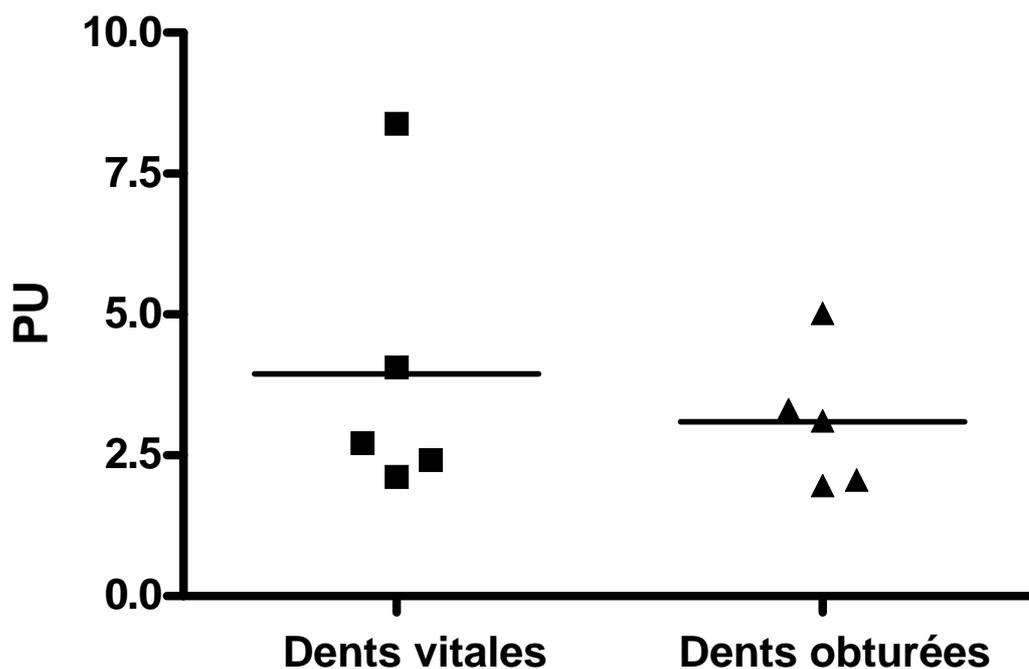
Les tests de fluxmétrie laser Doppler ont été effectués sur 5 étudiants en Odontologie, âgés de 20 à 25 ans, en bon état de santé générale et dentaire.

Des enregistrements de dents obturées endodontiquement (n=5) sont réalisés sur des incisives maxillaires présentant un traitement endodontique satisfaisant et une obturation coronaire palatine en composite. Ces derniers ont tous été victimes d'un traumatisme dentaire à l'adolescence, ayant conduit leur chirurgien-dentiste à réaliser un traitement canalaire sur la dent traumatisée. Les incisives maxillaires controlatérales vitales sont testées en tant que contrôles. Leur vitalité est vérifiée par un test au froid et un test électrique. Des radiographies rétroalvéolaires sont prises.

Les données sont enregistrées pendant 3 minutes conformément aux recommandations du fabricant.

### **4.2.2 RESULTATS**

Des enregistrements des flux sanguins pulpaire d'incisives maxillaires obturées (n=5) et des incisives controlatérales vitales (contrôles) n'ont montré aucune différence statistiquement significative ( $p=3$ ) entre le groupe de dents vitales et le groupe de dents obturées. Les valeurs mesurées sur les dents obturées s'avèrent chez 2 étudiants plus élevées que les valeurs mesurées sur dents vitales (Fig. 47 et 48). Les valeurs numériques moyennes obtenues sur les dents à pulpe vitale s'étendent de 2,12PU à 8,39PU avec une moyenne de 3,942PU. Les valeurs numériques moyennes retrouvées sur les dents obturées s'étendent de 1,96PU à 5,02PU avec une moyenne de 3,092PU. Il faut noter toutefois que les courbes d'enregistrement des dents obturées ne sont pas synchrones au rythme cardiaque, alors que les courbes d'enregistrement des dents à pulpe vitale sont synchronisées par rapport au rythme cardiaque du sujet.



**Figure 47 : Enregistrements par fluxmétrie laser Doppler des flux sanguins pulpaire d'incisives maxillaires obturées et vitales (contrôles) sur 5 étudiants (exprimés en valeurs numériques).**

Etudiants	Valeurs en PU enregistrées sur incisives maxillaires vitales	Valeurs en PU enregistrées sur incisives maxillaires non vitales
A	4,06	2,06
B	2,72	1,96
C	2,42	3,31
D	8,39	5,02
E	2,12	3,11

**Figure 48 : Valeurs en PU des enregistrements par fluxmétrie laser Doppler des incisives maxillaires obturées et vitales (contrôles) sur chacun des 5 étudiants testés.**

Les valeurs numériques enregistrées par fluxmétrie laser Doppler n'ont pas permis, dans nos conditions d'utilisation, de distinguer les dents vitales des dents obturées. Nous avons alors contacté le représentant français de PERIMED. Celui-ci nous a apporté une mise à jour du logiciel Perisoft permettant d'enregistrer et de visualiser les courbes de vitesse des hématies en plus des courbes de flux sanguin pulpaire, le flux sanguin pulpaire étant proportionnel au produit de la concentration des hématies par leur vitesse moyenne. Nous avons donc comparé les courbes de vitesse des hématies enregistrées sur incisives vitales et obturées chez les 5 étudiants.

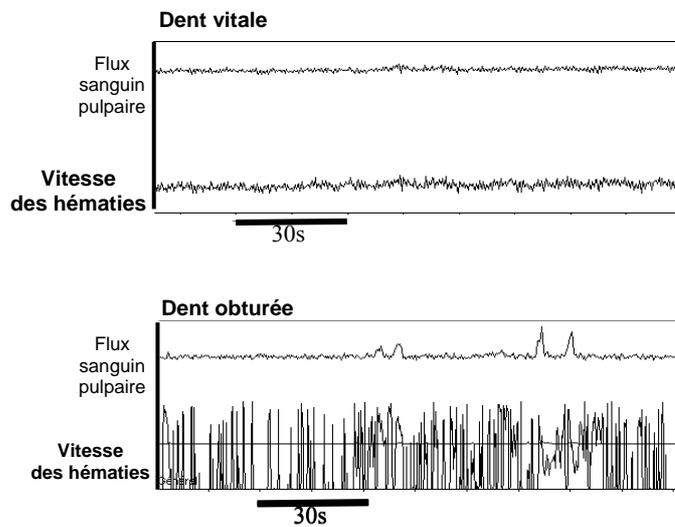
#### **4.3 *ETUDE DES COURBES DE VITESSE DES HEMATIES ENREGISTREES SUR DES DENTS VITALES ET DES DENTS OBTUREES***

##### **4.3.1 ECHANTILLON**

Le logiciel a permis de visualiser la courbe de vitesse des hématies et la courbe de flux sanguin pulpaire sur les enregistrements effectués chez les étudiants présentés au paragraphe précédent.

##### **4.3.2 RESULTATS**

Les courbes de vitesse des hématies ont été étudiées sur les enregistrements d'incisives maxillaires obturées (n=5) et des incisives controlatérales vitales (contrôles). Les courbes de vitesse des hématies des dents vitales sont très différentes des courbes de vitesse des hématies des dents non vitales. En effet, les courbes obtenues sur les dents vitales sont homogènes, avec une succession de petites oscillations régulières, qui ressemble à la courbe de flux sanguin pulpaire. Les « courbes de vitesse des hématies des dents obturées » sont une suite de lignes verticales. Un exemple est présenté dans la figure 49.



**Figure 49 : Enregistrement des courbes de vitesse des hématies par fluxmétrie laser Doppler.**

#### **4.4. DISCUSSION**

La première étape des tests comparatifs de fluxmétrie laser Doppler sur dents obturées a montré une grande variabilité intra-individuelle des valeurs numériques exprimées en PU. Cette variabilité peut être imputée aux causes précédemment décrites. Les valeurs numériques de certains enregistrements de dents obturées se sont avérées supérieures aux valeurs numériques de la dent vitale controlatérale utilisée comme contrôle.

Les valeurs numériques mesurées par fluxmétrie laser Doppler n'ont donc pas permis de distinguer nettement les dents obturées dans les conditions d'enregistrement de l'étude. Pourtant, théoriquement si les courbes observées lors des enregistrements correspondent bien à l'exploration du flux sanguin pulpaire, les dents non vitales devraient présenter des valeurs numériques très basses, voire nulles, dans la mesure où il n'existe plus de vascularisation pulpaire sur ces dents traitées endodontiquement. Nos résultats sont en contradiction avec celles d'autres auteurs qui considèrent que la fluxmétrie laser Doppler est une bonne méthode

d'évaluation du flux sanguin pulpaire (Emshoff et coll., 2004a ; Emshoff et coll., 2004b ; Strobl et coll., 2004). Toutefois, ces auteurs étudient la fluxmétrie laser Doppler dans le diagnostic de la vitalité pulpaire en traumatologie, sur des dents non obturées, pour leur absence de réponse aux tests de sensibilité. Dans notre étude, les enregistrements sur dents à pulpe non vitale ont été effectués sur des dents dépulpées et obturées. Il est possible que ce traitement endodontique à la gutta percha ait modifié les propriétés optiques de la dent et donc ait interféré avec le rayonnement laser. Mais il n'a pas été possible de constituer un échantillon de sujets jeunes présentant des incisives maxillaires non vitales non obturées endodontiquement pour vérifier cette hypothèse.

Les courbes de flux sanguin pulpaire des dents vitales, exprimées en PU, étaient les seules courbes à être synchronisées avec le rythme cardiaque. Cet élément d'appréciation est néanmoins critiquable car il est basé sur la prise du pouls radial du patient corrélé aux pics des courbes enregistrées. L'utilisation d'un capteur de pouls ou d'un électrocardiographe permettrait de vérifier si la synchronisation des courbes avec le rythme cardiaque sur les dents à pulpe vitale peut être considérée comme un outil diagnostique fiable de la vitalité pulpaire.

**En conclusion, l'ensemble de nos résultats montre que les enregistrements des valeurs numériques (PU) des flux sanguins pulpaires obtenus sur les dents à pulpe vitale et sur les dents obturées ne permettent pas l'utilisation du flux sanguin pulpaire comme moyen de diagnostic de la vitalité pulpaire en pratique clinique courante.**

Cependant la fluxmétrie laser Doppler permet d'explorer d'autres données. Les améliorations apportées au logiciel Perisoft ouvrent de nouvelles perspectives. Dans la troisième étape de tests comparatifs, il a été possible de visualiser non seulement les courbes de flux sanguin pulpaire, mais aussi les **courbes de vitesse des hématies**. Rappelons que le flux sanguin est proportionnel au produit de la concentration par la vitesse de déplacement des cellules sanguines. **Les courbes de vitesse des hématies ont permis de distinguer les dents à pulpe vitale des dents obturées endodontiquement car leurs courbes de vitesse des hématies sont très différentes, ceci quelle que soit la température de la pièce et la présence ou l'absence de la digue.**

**Les courbes de vitesse des hématies ont permis de distinguer les dents à pulpe vitale des dents obturées quand les valeurs numériques du flux sanguin pulpaire ne le permettaient pas avec certitude. Les courbes de vitesse des hématies peuvent à présent être étudiées dans un contexte clinique réel. Cette méthode d'investigation de la vitalité pulpaire va être comparée aux tests de sensibilité conventionnels sur des dents traumatisées.**

## **5 APPLICATION CLINIQUE DE LA FLUXMETRIE LASER DOPPLER POUR L'EVALUATION DE LA VITALITE PULPAIRE DANS LE CAS PARTICULIER DES LUXATIONS DENTAIRES**

Comme nous l'avons montré précédemment, l'efficacité de la fluxmétrie laser Doppler a fait l'objet de nombreuses publications en traumatologie. Les études menées essentiellement sur les valeurs numériques et les courbes de flux sanguin pulpaire avaient pour objectif d'établir une méthode diagnostique permettant d'évaluer le plus rapidement possible l'état de la vascularisation pulpaire. Tous les auteurs sont conscients que les tests de sensibilité conventionnels évaluent la réponse nerveuse sensorielle de la pulpe mais qu'une dent traumatisée peut rester insensible à ces tests pendant une longue période voire définitivement sans pour autant être nécrosée. De ce fait, un traitement endodontique injustifié est parfois réalisé en cas d'absence de réponse positive aux tests de sensibilité faisant suspecter à tort une nécrose pulpaire. La fluxmétrie laser Doppler pourrait aider à mieux évaluer la vitalité pulpaire à la suite d'un traumatisme dentaire et ainsi éviter des thérapeutiques inutiles ou inappropriées. La plupart des publications sur la fluxmétrie laser Doppler en traumatologie évaluent des dents ayant subi une luxation ou une expulsion dentaire (Emshoff et coll., 2004a ; Emshoff et coll., 2004b ; Strobl et coll., 2004). Ceci est dû au fait qu'il est difficile de tester la fluxmétrie laser Doppler sur des dents avec une fracture coronaire, une fracture radiculaire et/ou un fracas osseux associés.

Nous nous sommes donc intéressés exclusivement aux luxations de dents permanentes dans cette étude, car ce cas particulier de traumatismes dentaires nous permet de constituer un

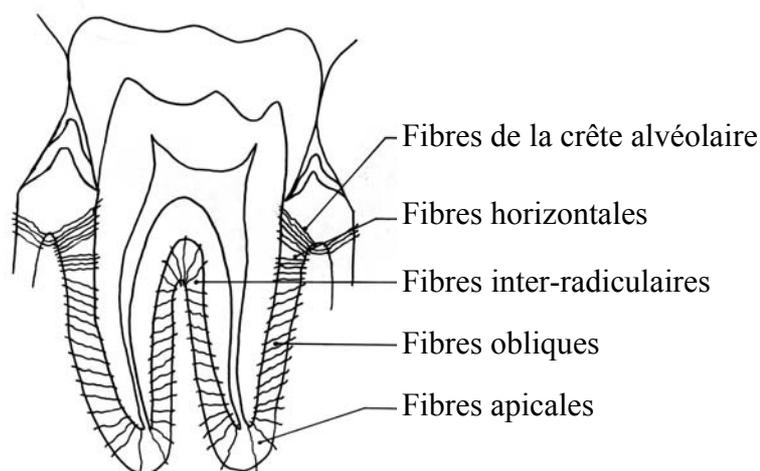
échantillon homogène et suffisant parmi les patients consultant au Pôle Odontologie de CHU de Nantes. Nous avons volontairement exclu les cas d'intrusion car ce traumatisme dentaire, qui correspond à l'enfoncement de la dent dans son alvéole, s'accompagne d'un écrasement des tissus parodontaux et du système vasculo-nerveux apical. Les complications périapicales des intrusions sont très fréquentes et il est admis que dans la grande majorité de ces cas, la pulpe dentaire se nécrose (Flores et coll., 2007).

## ***5.1 RAPPELS SUR LES LUXATIONS DENTAIRES***

Nous décrivons ici les luxations dentaires au sens large, à savoir les extrusions ou luxations axiales, les luxations latérales avec atteintes osseuses vestibulaires, mais aussi les subluxations et les concussions. Avant de les présenter en détails, il convient d'évoquer les dommages provoqués par le traumatisme dentaire et les processus de réparation.

### **5.1.1 CONSEQUENCES DES LUXATIONS DENTAIRES SUR LES TISSUS DE SOUTIEN DE LA DENT**

Les luxations dentaires sont considérées comme des traumatismes de rupture au niveau des tissus osseux et parodontaux. Le ligament alvéolo-dentaire est composé de faisceaux de fibres de collagène qui assurent l'ancrage de la dent dans l'alvéole et s'oppose à son extrusion (Fig. 50). Le traumatisme entraîne une rupture des fibres de collagène. Une cicatrisation est néanmoins possible par une réattache des fibres desmodontales grâce à la population cellulaire du desmodonte : fibroblastes, cémentoblastes et ostéoblastes.



**Figure 50 : Représentation schématique de l'organisation des principaux groupes de fibres du ligament alvéolo-dentaire.**

Au niveau osseux, le traumatisme peut occasionner un écrasement ou une fracture. Les tissus osseux endommagés seront alors éliminés sous l'action des macrophages et des ostéoclastes. Le traumatisme concerne également le paquet vasculo-nerveux apical qui peut être étiré ou même sectionné. La réaction inflammatoire déclenchée par le traumatisme présente les mêmes caractéristiques que la réaction inflammatoire de la pulpe dentaire, évoquée dans la première partie de ce travail.

Après un traumatisme dentaire tel qu'une luxation ou une expulsion, une revascularisation et une réinnervation de la pulpe dentaire est décrite sur les dents permanentes immatures (Andreasen et Andreasen, 2005). Les mécanismes de réparation sont favorisés par un repositionnement de la dent dans sa position initiale. Une contamination pulpaire bactérienne est possible en cas de communication du desmodonte avec le milieu buccal. Une infection du péri-apex est dans ce cas à redouter (Andreasen et Andreasen, 2005).

A l'agression que constitue le traumatisme, la pulpe peut répondre par la nécrose, l'oblitération canalaire ou la résorption interne. La nécrose est due au fait que la pulpe est enfermée dans une cavité et que contrairement aux autres tissus de l'organisme où la cicatrisation intervient par la vascularisation collatérale, ici, l'isolement de la pulpe ne permet pas aux tissus collatéraux de participer à la guérison. Le traumatisme aboutit alors à une nécrose pulpaire par impossibilité de revascularisation. L'oblitération canalaire est la réduction de l'espace endodontique par apposition pseudo-dentinaire, signant une augmentation de la dentinogénèse par les odontoblastes. La résorption interne est en revanche

la destruction localisée des parois dentinaires, par transformation de la pulpe en un tissu de granulation générant des ostéoclastes actifs aptes à résorber les parois pulpaire, ce qui peut aller jusqu'à la perforation.

### 5.1.2 EXTRUSIONS

Ces lésions sont définies par un déplacement partiel de la dent hors de son alvéole, dans une direction axiale (Andreasen et Andreasen, 2000 ; Flores et coll., 2007). Une dent luxée paraît plus longue que les dents controlatérales et elle n'est retenue dans l'alvéole que par quelques fibres desmodontales. Ces fibres sont généralement dilacérées. Le ligament parodontal et le système neuro-vasculaire du tissu pulpaire sont sévèrement atteints. On assiste ainsi à un étirement voire une rupture de la vascularisation pulpaire au niveau de l'apex de la dent (Fig. 51) (Andreasen et coll., 2003).



**Figure 51 : Schéma représentant une extrusion (d'après Marcano et Berna, 1999).**

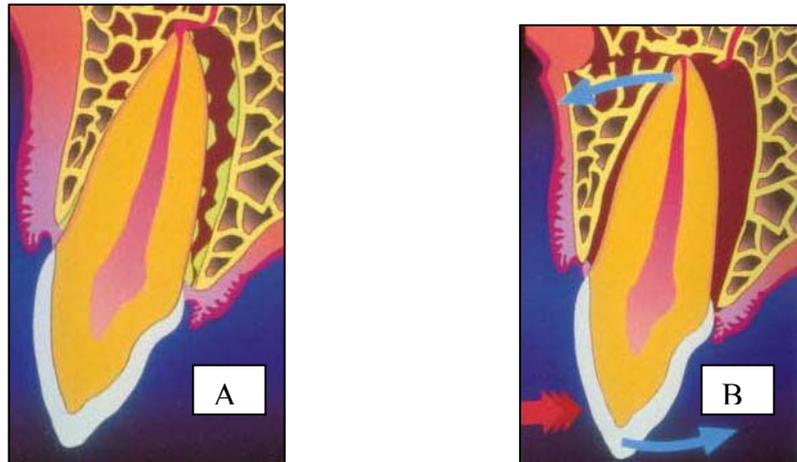
Un saignement sulculaire accompagne toujours le tableau clinique, dont la gravité dépend de l'importance du déplacement dentaire (Barnett, 2002). La dent extrusée présente une mobilité qui diminue dans les jours suivant l'extrusion. La percussion est douloureuse. Les tests pulpaire immédiats sont le plus souvent négatifs car le traumatisme a lésé les fibres nerveuses. L'examen radiographique montre un espace desmodontal augmenté (Andreasen et coll., 2003 ; Flores et coll., 2007).

Le traitement immédiat des extrusions consiste en un repositionnement précis et atraumatique de la dent dans son alvéole. Pendant la manœuvre, il est possible d'observer le long de l'épithélium sulculaire, l'extrusion du caillot formé entre la dent et l'alvéole. La réalisation d'une anesthésie locale n'est pas nécessaire. Une contention souple est mise en place afin de maintenir la dent dans sa position physiologique pour favoriser le processus de réparation et éviter la tendance à une extrusion secondaire (Andreasen et Andreasen, 2005 ; Ebeleseder et coll., 1995 ; Flores et coll., 2007). Les recommandations de l'IADT (International Association for Dental Traumatology) sont de garder la contention pendant 2 semaines (Flores et coll., 2007).

Une surveillance de la sensibilité pulpaire et des contrôles radiographiques sont effectués régulièrement (toutes les deux semaines dans les deux mois suivant le traumatisme dentaire, puis à 6 mois, puis une fois par an) pour objectiver ou non l'apparition de résorptions radiculaires, d'une oblitération canalaire ou d'une nécrose pulpaire (Andreasen et coll., 2003).

### **5.1.3 LUXATIONS LATÉRALES**

En cas de luxation latérale, la dent semble partiellement sortie de son alvéole, avec une composante axiale mais aussi latérale (Barnett, 2002 ; Flores et coll., 2007). Ce traumatisme, qui présente un caractère de gravité plus marqué que les extrusions, intéresse les tissus dentaires, parodontaux et osseux (Fig. 52) (Barnett, 2002 ; Andreasen et coll., 2003).



**Figure 52 : Schémas représentant des luxations latérales sans fracture alvéolaire (A) et avec fracture alvéolaire (B) (d'après Marcano et Berna, 1999).**

Sur le plan clinique, la luxation est souvent responsable d'une fracture alvéolaire, révélée par l'existence d'un hématome dans la région apicale et parfois par la visualisation d'un apex au niveau d'une table alvéolaire, les dents étant le plus souvent luxées en direction palatine, les apex apparaissent au niveau de la corticale vestibulaire. Dans certains cas, la paroi alvéolaire fracturée est mobilisable (Barnett, 2002). La dent déplacée latéralement est souvent immobile car bloquée dans son alvéole. On observe un saignement au niveau du sillon gingival, associé à une sensibilité à la palpation du vestibule. Le test de percussion produit un son métallique du fait du contact direct entre la dent et l'os alvéolaire ; il peut s'avérer douloureux. Les tests de sensibilité pulpaire sont généralement négatifs (Andreasen et Andreasen, 2005 ; Flores et coll., 2007). En effet, en raison de la composante latérale du choc, les fibres desmodontales sont rompues ou comprimées et le paquet vasculo-nerveux apical est sectionné (Barnett, 2002).

A l'examen radiographique, la dent est déplacée, un espace ligamentaire élargi est souvent observé dans la partie apicale mais la fracture alvéolaire n'est pas toujours observable en raison de superposition des structures. La prise d'un cliché radiographique en incidence latérale peut aider à visualiser la fracture alvéolaire. Le bilan radiologique doit donc comporter des incidences intra et extra-orales (Andreasen et Andreasen, 2000 ; Flores et coll., 2007).

Dans cette forme de luxation, l'apex de la dent peut faire saillie à travers la paroi alvéolaire vestibulaire, ce qui complique le repositionnement de la dent (Crona-Larson et coll., 1991). Une anesthésie de bonne qualité est indispensable pour conduire le repositionnement de la dent luxée. Le praticien exerce une pression digitale sur la table

osseuse vestibulaire au niveau apical pour libérer l'apex, puis la dent est repositionnée, éventuellement à l'aide d'un davier. Une contention souple est mise en place pendant 4 semaines afin de maintenir la dent dans sa position physiologique pour favoriser le processus de réparation du ligament alvéolo-dentaire et de l'os alvéolaire (Flores et coll., 2007). Si le patient n'est vu que 48 heures après la survenue du traumatisme dentaire, le repositionnement s'avère difficile et traumatisant pour les tissus ; un alignement orthodontique sera alors entrepris secondairement (Andreasen et Andreasen, 2005).

Une surveillance de la sensibilité pulpaire et des contrôles radiographiques sont effectués pour prévenir d'éventuelles complications dans les mêmes délais que dans les cas d'extrusions (Andreasen et coll., 2003).

#### **5.1.4 SUBLUXATIONS**

La subluxation correspond à un étirement des structures parodontales avec rupture de quelques fibres ligamentaires mais sans déplacement de la dent. Elle est accompagnée d'un saignement localisé au sulcus gingival. Une gêne à l'occlusion est décrite. Le test de percussion est douloureux et les tests de sensibilité sont positifs. La radiographie ne montre aucun déplacement de la dent. Il n'est pas nécessaire de réaliser une contention pour favoriser la réparation des tissus (Andreasen et coll., 2003).

Les tests de sensibilité réalisés dans le suivi des dents traumatisées permettent de déterminer si la pulpe contient du tissu nerveux vivant. Pourtant, la vitalité pulpaire est définie par son irrigation sanguine ; ainsi, une dent traumatisée peut ne pas répondre aux tests thermiques et électriques mais saigner à l'ouverture de la chambre pulpaire. Cette observation clinique peut être expliquée par une réparation vasculaire apicale permettant une parfaite irrigation des tissus pulpaire sans réparation des fibres nerveuses sectionnées par le traumatisme. La pulpe dentaire vascularisée mais non innervée ne présente que peu de risques de se transformer en tissu nécrotique. Les traitements endodontiques dans ce cas sont inutiles. L'étude qui va suivre compare les résultats des enregistrements par le Periflux 5000 des courbes de vitesse des hématies aux résultats des tests de sensibilité réalisés sur des patients ayant consulté au Pôle odontologie du CHU de Nantes à la suite de luxations dentaires.

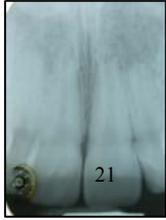
## **5.2 ECHANTILLON**

Les tests de fluxmétrie laser Doppler ont été effectués chez 13 patients, âgés de 9 à 21 ans, sans pathologie générale, pris en charge au CHU de Nantes à la suite de traumatismes dentaires. Chaque patient a donné son consentement libre et éclairé avant de participer à l'évaluation.

Les enregistrements sur dents traumatisées (n=24) ont été effectués sur des incisives maxillaires et mandibulaires, ainsi que sur des canines maxillaires, ayant présenté une extrusion, une luxation latérale ou une subluxation. Les caractéristiques des traumatismes et des tests sont présentées dans la figure 53. Les 13 patients inclus dans l'étude ont été soumis à un examen clinique et radiographique préalable de façon à exclure toute dent présentant une fracture coronaire associée à la luxation. Les tests de sensibilité conventionnels ont été effectués avec un test au froid (Pharmaethyl, Septodont, Saint-Maure-des-Fossés, France) et un test électrique (Analytic Technology, Redmond, WA, USA). Les enregistrements sont réalisés sur des sujets détendus, en position allongée dans les conditions décrites précédemment.

Patients	Age	Description du traumatisme dentaire (en gras dent testée)	Traitement du traumatisme dentaire	Photographies	Radiographie J0	Radiographie J test	Etat des tests de sensibilité conventionnels	Délai entre le traumatisme dentaire et le test
<b>A</b>	17 ans	<b>Subluxation 21</b>	Pas de contention				Positifs pendant tout le suivi	2 semaines
<b>B</b>	16 ans	<b>Subluxation 12</b> <i>Fracture coronaire de 41, 42, 31, 11, 21 ; expulsion de 21 ; luxation de 11 (mais fracture coronaire associée)</i>	Repositionnement Contention 4 semaines				Positifs pendant tout le suivi	6 mois
<b>C</b>	15 ans	<b>Subluxation 11</b> <b>Luxation axiale 21</b>	Repositionnement 11 Contention 4 semaines				Positifs sur 11 Négatifs sur 21 (dent minéralisée +++)	8 ans
<b>D</b>	18 ans	<b>Luxation palatine 21</b> <i>Fracture coronaire avec exposition pulpaire de 11</i>	Repositionnement 21 Contention 3 semaines				Faux négatif au test électrique à un rendez-vous de contrôle ; les tests se sont ensuite avérés positifs aux rendez-vous suivants	1 an

Patients	Age	Description du traumatisme dentaire (en gras dent testée)	Traitement du traumatisme dentaire	Photographies	Radiographie J0	Radiographie J test	Etat des tests de sensibilité conventionnels	Délai entre le traumatisme dentaire et le test
<b>E</b>	19 ans	Subluxation <b>23</b>	Pas de contention		Dossier non disponible	Dossier non disponible	Positifs	2 mois
<b>F</b>	10 ans	Luxation axiale <b>11</b> Subluxation <b>21</b> Subluxation <b>22</b>	Repositionnement Contention 2 semaines				Tests de sensibilité négatifs sur 21 surveillance régulière conseillée à la patiente sans qu'un traitement canalair ne soit décidé	3 mois
<b>G</b>	9 ans	Luxation palatine <b>11</b> Luxation palatine <b>21</b>	Repositionnement Contention 3 semaines				Négatifs	1 mois
<b>H</b>	13 ans	Luxation palatine <b>11</b>	Repositionnement Contention 3 semaines				Tests de sensibilité non reproductibles d'une séance sur l'autre depuis le traumatisme dentaire ; la patiente n'est pas revenue au CHU après la séance d'enregistrements	9 mois
<b>I</b>	21 ans	Subluxation <b>12</b> Subluxation <b>11</b> Subluxation <b>21</b>	Aucun traitement		Dossier non disponible	Dossier non disponible	Positifs sur 12 ; négatifs sur 21 ; froid négatif mais test électrique positif sur 11	7 ans

Patients	Age	Description du traumatisme dentaire (en gras dent testée)	Traitement du traumatisme dentaire	Photographies	Radiographie J0	Radiographie J test	Etat des tests de sensibilité conventionnels	Délai entre le traumatisme dentaire et le test
<b>J</b>	19 ans	Subluxation <b>11</b> Subluxation <b>41</b> Subluxation <b>21</b>	Repositionnement Contention 3 semaines		Dossier non disponible	Dossier non disponible	Positifs	1 mois
<b>K</b>	17 ans	Luxation palatine <b>21</b>	Repositionnement Contention 3 semaines				Négatifs changement de teinte de la dent qui devient plus foncée mais pas d'image radiologique	1 an
<b>L</b>	15 ans	Subluxation <b>23</b>	Pas de contention				Positifs	2 mois
<b>M</b>	12 ans	Luxation vestibulaire <b>21</b> <i>Luxation vestibulaire 11</i> <i>abcès le jour de la</i> <i>dépose de la contention</i>	Repositionnement Contention 3 semaines				Positifs le jour du test de fluxmétrie laser Doppler	4 semaines

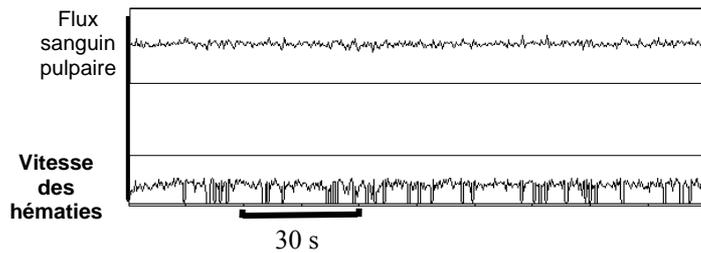
**Figure 53 : Tableau récapitulatif des traumatismes inclus dans l'étude.**

### **5.3 RESULTATS**

Dans cette dernière partie du travail de thèse nous avons comparé la réponse aux tests de sensibilité de dents traumatisées aux enregistrements des courbes de vitesse des hématies. La figure 54 montre les réponses obtenues aux tests de sensibilité effectués le jour du test de fluxmétrie laser Doppler et le type de courbe obtenue en fluxmétrie laser Doppler. Le résultat des enregistrements des courbes de vitesse des hématies est considéré comme positif quand la courbe est caractéristique d'une dent à pulpe vitale (oscillations régulières), le résultat des enregistrements des courbes de vitesse des hématies est considéré comme négatif quand la courbe est caractéristique d'une dent obturée (succession de lignes verticales). Mais dans 25% des cas, les courbes de vitesse des hématies ne sont pas interprétables. Elles présentent à la fois les caractéristiques des courbes de vitesse des hématies des dents à pulpe vitale et les caractéristiques des courbes de vitesse des hématies des dents obturées (Fig. 55). Dans la majorité des cas interprétables, les courbes de vitesse des hématies sont en adéquation avec les tests de sensibilité conventionnels (Fig. 54 et 56). Cependant, sur 3 dents (patients G et K) la courbe de vitesse des hématies est positive quand les tests de sensibilité conventionnels nous apportent une réponse négative (Fig. 54 et 56).

Patient	Type de traumatisme dentaire	Test au froid	Test électrique	Fluxmétrie laser Doppler
<b>A</b>	Subluxation 21	+	+	+
<b>B</b>	Subluxation 12	+	+	+
<b>C</b>	Subluxation 11	+	+	+
	Luxation axiale 21	-	-	Non interprétable
<b>D</b>	Luxation palatine 21	+	+	+
<b>E</b>	Subluxation 23	+	+	+
<b>F</b>	Luxation axiale 11	+	+	+
	Subluxation 21	-	-	Non interprétable
	Subluxation 22	+	+	+
<b>G</b>	Luxation palatine 11	-	-	+
	Luxation palatine 21	-	-	+
<b>H</b>	Luxation palatine 11	-	+	Non interprétable
<b>I</b>	Subluxation 12	+	+	+
	Subluxation 11	-	+	Non interprétable
	Subluxation 21	-	-	Non interprétable
<b>J</b>	Subluxation 11	+	+	+
	Subluxation 41	+	+	+
	Subluxation 21	+	+	+
<b>K</b>	Luxation palatine 21	-	-	-
	J+30	-	-	+
	J+90	-	-	Non interprétable
	traitement canalaire réalisé car image apicale radioclaire à la radiographie mais à l'ouverture de la dent saignement du tiers apical de la pulpe			
<b>L</b>	Subluxation 23	+	+	+
<b>M</b>	Luxation vestibulaire 21	+	+	+
	J+30	-	-	-
	J+37 abcès nécessitant un traitement canalaire.			

**Figure 54 : Tableau récapitulatif des résultats obtenus avec les tests de sensibilité et les courbes de vitesse des hématies.**



**Figure 55 : Enregistrement, par fluxmétrie laser Doppler, non interprétable de la courbe de vitesse des hématies d'une dent luxée.**

	Courbes de vitesse des hématies "vitalés" (n=16)	Courbes de vitesse des hématies "non vitalés" (n=2)	Courbes de vitesse des hématies non interprétables (n=6)	Total
Réponses positives à au moins un test de sensibilité	<b>n=13 (87%)</b> 1 luxation axiale 10 subluxations 1 luxation vestibulaire 1 luxation palatine	<b>n=0 (0%)</b>	<b>n=2 (13%)</b> 1 subluxation 1 luxation palatine	<b>15</b>
Réponses négatives aux tests de sensibilité conventionnels	<b>n=3 (33%)</b> 3 luxations palatine	<b>n=2 (22%)</b> 1 luxation vestibulaire 1 luxation palatine	<b>n=4 (44%)</b> 1 luxation axiale 2 subluxations 1 luxation palatine	<b>9</b>
Total	<b>16</b>	<b>2</b>	<b>6</b>	<b>24</b>

**Figure 56 : Comparaison des courbes de vitesse des hématies enregistrées par fluxmétrie laser Doppler et des tests de sensibilité conventionnels chez des patients présentant des dents luxées (n=24).**

#### 5.4 DISCUSSION

Les résultats des enregistrements sur des incisives vitales et sur des incisives dépulpées et obturées nous ont amenés à utiliser sur les dents traumatisées les courbes de vitesse des hématies pour distinguer les dents vitales des dents non vitales.

Cependant, les courbes de vitesse des hématies n'ont pas pu être interprétées dans 25% des cas de dents luxées étudiées. La plupart des dents dont les enregistrements sont ininterprétables répondent négativement aux tests de sensibilité conventionnels (patients C 21, F 21, I 21 et K 21 J+90). Le patient C a subi une luxation axiale de 21, 8 ans auparavant ; le cliché radiographique réalisé le jour du traumatisme montre une dent très immature qui depuis a poursuivi son édification radiculaire et dont le canal pulpaire s'est oblitéré ; cette minéralisation pulpaire ne permet pas de réaliser des tests de sensibilité fiables, comme cela a été exposé dans la première partie de cette thèse, et explique les résultats obtenus en fluxmétrie laser Doppler car l'épaisseur des tissus minéralisés ne doit pas permettre au rayonnement laser de parvenir jusqu'à la pulpe dentaire qu'elle soit vitale ou non. Les patients F (21) et I (21) sont suivis au Pôle odontologie du CHU de Nantes, les tests de sensibilité demeurent négatifs mais en l'absence de signes cliniques ou radiologiques de nécrose, il a été décidé de ne pas intervenir au niveau endodontique. Ces 2 cas de subluxations étaient associés à des traumatismes de dents adjacentes. Le traumatisme a pu entraîner la rupture de l'innervation de la pulpe ce qui expliquerait l'absence de réponse aux tests de sensibilité. Le cas (K 21 J+90) correspond à une incisive pour laquelle le patient avait une demande esthétique du fait de la coloration sombre de la couronne ; un traitement canalaire a été décidé dans l'idée de réaliser ensuite un blanchiment de la dent ; à l'ouverture de la dent un faible saignement a été constaté au niveau du tiers apical du canal, montrant que la dent présentait encore des signes de vitalité mais qu'elle était en train d'évoluer vers une inflammation chronique ou une nécrose. La 11 du patient H et la 11 du patient I sont intéressantes car elles présentent des courbes non interprétables et des résultats aux tests de sensibilité contradictoires. Ces dents répondent négativement au test au froid et positivement au test électrique, ce dernier ayant stimulé plus efficacement les fibres nerveuses pulpaires. La fluxmétrie laser Doppler ne peut donc pas toujours aider le praticien à établir un diagnostic de la vitalité pulpaire. Les difficultés d'interprétation des enregistrements peuvent être expliquées par des modifications de teinte des dents liées à la présence d'hématies en voie de

dégradation dans les tubuli dentinaires ou par la présence de dentine réactionnelle, comme nous l'avons dit précédemment.

Sur les dents traumatisées que nous avons étudiées, dans la majorité des cas (patients A 21, B 12, C 11, D 21, E 23, F 11 et 22, I 12, J 11 21 et 41, L 23, M 21), les courbes de vitesse des hématies sont en adéquation avec les tests de sensibilité conventionnels. Il s'agit pour 10 d'entre elles de subluxations dentaires. Les subluxations font partie des traumatismes parodontaux plus légers, ce qui explique ces excellents résultats.

Parmi les cas dont les résultats des enregistrements sont négatifs (K 21 et M 21+J30), on retrouve une incisive déjà citée (K) dont le premier enregistrement était négatif avant de devenir positif, puis non interprétable. Le traitement canalaire a été réalisé comme nous l'avons évoqué. L'autre cas (M) correspond à une dent luxée qui a présenté un abcès apical aigu à J+37, confirmant ainsi les résultats obtenus.

Cependant, dans certains cas (G 11 et 21 et K 21 J+30), la courbe de vitesse des hématies permet de poser le diagnostic de dent à pulpe vitale quand les tests de sensibilité conventionnels nous apportent une réponse négative. Si nous excluons le patient K déjà décrit et qui ne peut nous faire conclure à l'efficacité de la fluxmétrie laser Doppler en tant que moyen de diagnostic de la vitalité pulpaire, il nous reste le cas G caractérisé par les luxations palatines de 11 et 21. Il s'agit ici de cas de dents permanentes immatures. Ce résultat ne surprend pas car les tests de sensibilité pulpaire ne sont pas toujours significatifs lorsqu'ils sont pratiqués sur dent permanente immature. La revascularisation des dents permanentes immatures après traumatisme dentaire est également possible (Olgart et coll., 1988 ; Mesaros et coll., 1997 ; Lee et coll., 2001 ; Flores et coll., 2007). La fluxmétrie laser Doppler peut ainsi aider à déceler le flux sanguin pulpaire lorsque les tests thermiques et électriques ne détectent pas de sensibilité pulpaire (Mesaros et coll., 1997 ; Lee et coll., 2001). La fluxmétrie laser Doppler apporte alors des éléments nouveaux au diagnostic de la vitalité pulpaire en traumatologie.

**Les enregistrements des courbes de vitesse des hématies ont confirmé les réponses aux tests de sensibilité dans la plupart des cas des dents luxées de l'étude. En cas de doute, lorsque les résultats des courbes de vitesse des hématies n'étaient pas interprétables, il a été décidé de ne pas intervenir endodontiquement à moins qu'un accident infectieux ne se manifeste. Les courbes de vitesse des hématies ont permis de poser le diagnostic de dent à pulpe vitale quand les tests de sensibilité étaient négatifs sur des dents permanentes immatures. Or il est généralement admis que l'innervation pulpaire n'atteint sa maturité qu'au moment de la fermeture apicale de la racine (Nanci, 2007) et que, par conséquent, il convient de faire preuve de prudence quant à l'interprétation des tests de sensibilité sur dent immature et qu'un traitement canalaire ne peut être décidé que s'il existe des signes cliniques et radiographiques concomitants montrant une infection. Le résultat des enregistrements des courbes de vitesse des hématies n'a donc rien changé à notre attitude thérapeutique, il a juste conforté notre décision thérapeutique.**

# **CONCLUSION**

L'évaluation de la vitalité pulpaire en odontologie, et notamment en traumatologie, s'appuie sur trois moyens principaux de diagnostic : l'observation clinique, les tests de sensibilité pulpaire et la radiographie. L'examen clinique comprend l'inspection et la palpation exobuccales et endobuccales. Il peut révéler un changement de teinte de la dent examinée. Or, nous savons qu'en traumatologie ce changement de teinte peut être transitoire. Les tests de sensibilité, lorsqu'ils sont positifs, provoquent une réponse douloureuse de la dent testée à une stimulation thermique ou électrique. Or, après un traumatisme, la réponse aux tests de sensibilité est très perturbée par la perception du souvenir de la douleur ressentie au moment puis dans les heures qui ont suivi le traumatisme. Une surveillance clinique régulière est indispensable dans l'attente de signes cliniques évidents de vitalité ou de nécrose. L'interprétation radiographique reste subjective et un délai peut exister avant qu'un symptôme clinique ne se manifeste. Par conséquent, nos moyens de diagnostic de la vitalité pulpaire présentent des limites car nous ne disposons pas de moyen d'analyse directe de l'état histopathologique du parenchyme pulpaire. Il faut donc admettre que le diagnostic de la pulpe est difficile à déterminer avec certitude.

Pour cette raison, les odontologistes se sont intéressés à la fluxmétrie laser Doppler dans l'idée que cette méthode d'exploration de la microvascularisation, qui a fait ses preuves dans d'autres spécialités médicales, pourrait être un outil d'investigation de la vascularisation pulpaire. L'étude de la littérature a montré des résultats encourageants mais aussi contradictoires. Certains auteurs mettent en avant l'utilité de la fluxmétrie laser Doppler pour distinguer une dent vitale d'une dent nécrosée. D'autres ont démontré les difficultés d'enregistrer de manière sensible le flux sanguin pulpaire.

Dans de ce travail, nous avons testé la fluxmétrie laser Doppler de dernière génération au moyen du Periflux System 5000 (Perimed, Stockholm, Sweden) dans des conditions de pratique clinique courante. Les valeurs numériques enregistrées n'ont pas permis de distinguer les dents vitales des dents obturées dans nos conditions d'utilisation. Ces résultats nous ont conduits à nous intéresser à d'autres données que la fluxmétrie laser Doppler permet aussi d'explorer : les courbes de vitesse des hématies. Notre étude a, dans un premier temps, montré que ces courbes permettaient de diagnostiquer la vitalité pulpaire. En effet, les courbes de vitesse des hématies des dents vitales sont très différentes de ce qui est sensé représenter les « courbes de vitesse des hématies des dents obturées ». Les résultats des enregistrements des courbes de vitesse des hématies ont aussi été comparés aux réponses aux tests de

sensibilité conventionnels sur des dents luxées non obturées afin de savoir si la fluxmétrie laser Doppler pouvait aider au diagnostic de la vitalité pulpaire des dents traumatisées. Dans la majorité des cas, les courbes de vitesse des hématies sont en adéquation avec les tests de sensibilité conventionnels ce qui n'apporte rien de plus à notre méthode d'examen conventionnelle. Cependant, dans 2 cas de dents permanentes immatures la courbe de vitesse des hématies a pu permettre de poser le diagnostic de pulpe vitale quand les tests de sensibilité étaient négatifs. Il est admis qu'une dent présentant une édification radiculaire encore incomplète, à l'apex largement ouvert sur le parodonte, peut, en cas de traumatisme, voir une vascularisation collatérale s'organiser. Cette vascularisation est susceptible de permettre la cicatrisation alors que l'innervation incomplète des dents immatures ne permet pas de réponse aux tests de sensibilité. Ce résultat est intéressant mais n'a modifié en rien notre attitude thérapeutique devant ce type de traumatisme.

La recherche d'un moyen de diagnostic de la vitalité pulpaire efficace et applicable à toutes les circonstances cliniques, demeure une préoccupation majeure en odontologie. Dans des conditions de pratique clinique, la fluxmétrie laser Doppler n'a pas répondu aux espérances qu'elle suscitait. Cette technique onéreuse est difficile à mettre en place pour un chirurgien-dentiste car la procédure est longue, un repos de 10 minutes du patient étant indispensable ainsi qu'un calibrage préalable, un porte-sonde doit être collé sur la dent du patient ce qui alourdit le protocole et l'examen doit être réalisé sans que le patient ne fasse aucun mouvement. Elle demeure néanmoins une technique intéressante en recherche dans le cadre d'une utilisation expérimentale.

**REFERENCES**  
**BIBLIOGRAPHIQUES**

-A-

**ABD-ELMEGUID A et YU DC.**

Dental pulp neurophysiology: part 1. Clinical and diagnostic implications.  
J Can Dent Assoc 2009a;**75**(1):55-9.

**ABD-ELMEGUID A et YU DC.**

Dental pulp neurophysiology: part 2. Current diagnostic tests to assess pulp vitality.  
J Can Dent Assoc 2009b;**75**(2):139-143.

**AMERICAN DENTAL ASSOCIATION COUNCIL OF MEDICAL AFFAIRS.**

The use of dental radiographs: update and recommendations.  
J Am Dent Assoc 2006;**137**(9):1304-12.

**ANDREASEN JO et ANDREASEN FM.**

Essentials of Traumatic Injuries to the Teeth.  
St Louis: Mosby, 2000.

**ANDREASEN JO, ANDREASEN FM, BAKLAND LK et FLORES MT.**

Traumatic Dental Injuries.  
St Louis: Mosby, 2003.

**ANDREASEN JO et ANDREASEN FM.**

Textbook and Color Atlas of Traumatic injuries to the Teeth.  
St Louis : Mosby, 2005.

**AURENGO A, PETITCLERC T et GREMY F.**

Biophysique.  
Paris : Médecine-Sciences, Flammarion, 2003.

-B-

**BARNETT F.**

The role of endodontics in the treatment of luxated permanent teeth.  
Dental Traumatol 2002;**18**:47-56.

**BAUME LJ et FIORE-DONNO G.**

Vues nouvelles sur le diagnostic différentiel des pulpopathies.  
Méd Hyg 1962;**20**:543-571.

**BENDER IB.**

Pulpal pain diagnosis-a review.  
J Endod. 2000;**26**(3):175-9.

**BERLIEN HP et MÜLLER GJ.**

Applied laser medicine.  
Berlin: Springer, 2003.

**BERTOLOTTI M.**

The history of the laser.  
Rome: IOP, 2004.

**BJORNDAL L.**

Presence or absence of tertiary dentinogenesis in relation to caries progression.  
Adv Dent Res 2001;**15**:80-83.

**BRANNSTRÖM M.**

The hydrodynamic theory of dentinal pain: sensation in preparations, caries, and the dentinal crack syndrome.  
J Endod 1986;**12**(10):453-7.

**BRICKER SL, LANGLAIS RL et MILLER CS.**

Oral Diagnosis, Oral Medicine and Treatment Planning. Édition : 2.  
Hamilton, Ontario: Lavoisier, 2002.

**BRISSET T.**

Photoplethysmography: a diagnostic aid in conservative dentistry-endodontics.  
Odontostomatol Trop 1999;**22**(86);5-8.

**BUECHE FJ et HECHT E.**

Physique pour les sciences de la vie.  
Paris : Dunod, 2002.

**-C-**

**CHOI CM et BENNETT RG.**

Laser Dopplers to determine cutaneous blood flow.  
Dermatol Surg 2003;**29**(3):272-80. Review.

**CRONA-LARSON G, BJARNRSON S et NORÈN JG.**

Effect of luxation injuries on permanent teeth.  
Endod Dent Traumatol 1991;**7**:199-206.

**CSELE M.**

Fundamentals of light sources and lasers.  
Hoboken, New-Jersey: John Wiley & sons, 2004.

**-D-**

**DOPPLER JC.**

On the colored light of the double stars and certain other stars of the heavens.  
Prague: Royal Bohemian Society of Sciences, 1842.

**-E-**

**EBELESSEDER KA, GLOCKNER K, PERTL C et coll.**

Splints made of wire and composite: an investigation of lateral tooth mobility in vivo.  
Endod Dent Traumatol 1995;**10**:282-285.

**EBIHARA A, TOKITA Y, IZAWA T et SUDA H.**

Pulpal blood flow assessed by laser Doppler flowmetry in a tooth with a horizontal root fracture.  
Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 1996;**81**:229-233.

**EDWALL B, GAZELIUS B, BERG J et coll.**

Blood flow changes in the dental pulp of the cat and rat measured simultaneously by laser Doppler flowmetry.  
Acta Physiol Scand 1987;**131**:81-91.

**EINSTEIN A**

Zur Quantentheorie der Strahlung.  
Physikalische Zeitschrift 1917;**18**:121-128.

**EINSTEIN A et INFELD L.**

The Evolution of Physics.  
Cambridge: University Press, 1938.

**EMSHOFF R, EMSHOFF I, MOSCHEN I, STROBL H.**

Diagnostic characteristics of pulpal blood flow levels associated with adverse outcomes of luxated permanent maxillary incisors.  
Dent Traumatol 2004a;**20**:270-5.

**EMSHOFF R, KRANEWITTER R, GERHARD S et coll.**

Effect of segmental Le Fort osteotomy on maxillary tooth type-related pulpal blood flow characteristics.  
Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 2000a;**89**:749-752.

**EMSHOFF R, KRANEWITTER R et NORER B.**

Effect of Le Fort osteotomy on maxillary tooth-type-related pulpal blood flow characteristics.  
Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 2000b;**89**:88-90.

**EMSHOFF R, MOSCHEN I, STROBL H.**

Use of laser Doppler flowmetry to predict vitality of luxated or avulsed permanent teeth.  
Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 2004b;98:750-5.

**EVANS D, REID J, STRANG R et STIRRUPS D.**

A comparison of laser Doppler flowmetry with other methods of assessing the vitality of traumatised anterior teeth.  
Endod Dent Traumatol 1999;15:284-290.

**-F-**

**FARGES JC et MAGLOIRE H.**

Structure des dents (complexe pulpodentinaire).  
In : PIETTE E et GOLDBERG M. La dent normale et pathologique.  
Bruxelles : De Boeck Université, 2001.

**FLORES MT, MALMGREN B, ANDERSSON L, ANDREASEN JO, BAKLAND LK, BARNETT F, BOURGUIGNON C, DIANGELIS A, HICKS L, SIGURDSSON A, TROPE M, TSUKIBOSHI M, VON ARX T et INTERNATIONAL ASSOCIATION OF DENTAL TRAUMATOLOGY.**

Guidelines for the management of traumatic dental injuries. I. Fractures and luxations of permanent teeth.  
Dental Traumatol 2007;23(2):66-71.

**FRATKIN R, KENNY D et JOHNSTON D.**

Evaluation of a laser Doppler flowmeter to assess blood flow in human primary incisor teeth.  
Pediatr Dent 1999;21:53-56.

**FREDRIKSSON I, FORS C et JOHANSSON J.**

Laser Doppler Flowmetry. A theoretical framework.  
Departement of Biomedical Engineering, Linköping University 2007;www.itm.se/bit/ldfmain.html.

**-G-**

**GAZELIUS B, OLGART L, EDWALL B, EDWALL L.**

Non-invasive recording of blood flow in human dental pulp.  
Endod Dent Traumatol 1986;2:219-21.

**GAZELIUS B, OLGART L, EDWALL B.**

Restored vitality in luxated teeth assessed by laser Doppler flowmeter.  
Endod Dent Traumatol 1988;4:265-8.

**GIACHETTI L, ERCOLANI E, BAMBI C et LANDI D.**

Sclerotic dentin: aetio-pathogenic hypotheses.  
Minerva Stomatol 2002;51(7/8):285-292.

**GOHO C.**

Pulse oximetry evaluation of vitality in primary and immature permanent teeth.  
Pediatr Dent 1999;21(2):125-127.

**GOPIKRISHNA V, PRADEEP G et VENKATESHBABU N.**

Assessment of pulp vitality: a review.  
Int J Paediatr Dent. 2009;19(1):3-15.

**-H-**

**HARADA K, SATO M, OMURA K.**

Blood-flow change and recovery of sensibility in the maxillary dental pulp during and after maxillary distraction: a pilot study.  
Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 2004;98:528-32.

**HARTMANN A, AZERAD J et BOUCHER Y.**

Environmental effects on laser Doppler pulpal blood-flow measurements in man.  
Arch Oral Biol 1996;41:333-339.

**HECHT J.**

The Race to Make The Laser.  
Oxford: Oxford University Press, 2005.

**HEITHERSAY G et HIRSCH R.**

Tooth discoloration and resolution following a luxation injury: significance of blood pigment in dentin to laser Doppler flowmetry readings.  
Quintessence Int 1993;**24**:669-676.

**HEYERAAS KJ et KVINNSLAND I.**

Tissue pressure and blood flow in pulpal inflammation.  
Proc Finn Dent Soc 1992;**88**:393-401.

**HIMEL VT.**

Diagnostic procedures for evaluating pulpally involved teeth.  
Prosthet Endod 1992;**2**:72-77.

**HOBBIE R K et ROTH BJ.**

Intermediate Physics for Medicine and Biology.  
Oakland: American Institute of Physics, 2006.

-I-

**IANNUCCI JM et HOWERTON.**

Dental radiography. Principles and techniques.  
Saint-Louis, Missouri: 2006

**IGARASHI T, YABUKI S, KIKUCHI S, MYERS RR.**

Effect of acute nerve root compression on endoneurial fluid pressure and blood flow in rat dorsal root ganglia.  
J Orthop Res. 2005;**23**(2):420-4.

**IJIMA T et ZHANG JQ.**

Three-dimensional wall structure and the innervation of dental pulp blood vessels.  
Microsc Res Tech. 2002;**56**(1):32-41.

**IKAWA M, HORIUCHI H et IKAWA K.**

Optical characteristics of human extracted teeth and the possible application of photoplethysmography to the human pulp.  
Arch Oral Biol 1994;**39**(10):821-827.

**INGOLFSSON A, TRONSTAD L, HERSH E, RIVA CE.**

Effect of probe design on the suitability of laser Doppler flowmetry in vitality testing of human teeth.  
Endod Dent Traumatol 1993;**9**:65-70.

**INGOLFSSON A, TRONSTAD L, HERSH E, RIVA CE.**

Efficacy of laser Doppler flowmetry in determining pulp vitality of human teeth.  
Endod Dent Traumatol 1994;**10**:83-87.

-J-

**JAFARZADEH H.**

Laser Doppler flowmetry in endodontics: a review.  
Int Endod J. 2009;**42**(6):476-90.

**JANTSCH HH, KEMPPAINEN P, RINGLER R, HANDWERKER HO et FORSTER C.**

Cortical representation of experimental tooth pain in humans.  
Pain 2005;**118**(3):390-9.

**JEAN A, KEREDEL B et KEREDEL LM.**

Scanning electron microscope study of the predentin-pulpal border zone in human dentin.  
Oral Surg Oral Med Oral Pathol 1986;**61**:392-398.

**JOHNSON WT.**

Color Atlas of Endodontics.  
Iowa City: Saunders, 2002.

**JONES DM.**

Effect of the type carrier used on the results of dichlorofluoromethane application to teeth.  
J Endod 1999;**25**:692-694.

**JONES VR, RIVERA EM et WALTON RE.**

Comparison of carbon dioxide versus refrigerant spray to determine pulpal responsiveness.  
J Endod 2002;**28**:531-533.

**JORDAN CK et LEWIS MAO.**

A color handbook of oral medicine.  
New York: Thieme, 2004.

**-K-**

**KIM S, LIU M, MARKOWITZ K, BILOTTO G et DORSCHER-KIM J.**

Comparison of pulpal blood flow in dog canine teeth determined by the laser Doppler and the 133xenon washout methods.  
Arch Oral Biol 1990;**35**(5):411-413.

**KNOBLOCH K, LICHTENBERG A, PILCHMAIER M, TOMASZEK S, KRUG A et HAVERICH A.**

Palmar Microcirculation After Harvesting of the Radial Artery in Coronary Revascularization.  
Ann Thorac Surg 2005;**79**:1026-1030.

**-L-**

**LEE J, YANPISET K, SIGURDSSON A et VANN W.**

Laser Doppler flowmetry for monitoring traumatized teeth.  
Dent Traumatol 2001;**17**:231-235.

**LEVIN LG, LAW AS, HOLLAND GR, ABBOTT PV et RODA RS.**

Identify and define all diagnostic terms for pulpal health and disease states.  
J Endod 2009;**35**(12):1645-57.

**LIN J et CHANDLER NP.**

Electric pulp testing: a review.  
Int Endod . 2008;**41**(5):365-74.

**-M-**

**MAGLOIRE H, COUBLE ML, THIVICHON-PRINCE B, MAURIN JC et BLEICHER F.**

Odontoblast: a mechano-sensory cell.  
J Exp Zool B Mol Dev Evol 2009;**15**: 416-24.

**MAIMAN TH.**

Stimulated Optical Radiation in Ruby.  
Nature 1960; **4736**(187):493-494.

**MARCANO PB et BERNA AM.**

Traumatologia dental.  
In : VARELLA M. problemas bucodentales en pediatria.  
Madrid : Ediciones Ergon, 1999.

**MESAROS S et TROPE M.**

Revascularization of traumatized teeth assessed by laser Doppler flowmetry: case report.  
Endod Dent Traumatol 1997;**13**:24-30.

**MICHAELSON PL et HOLLAND GR.**

Is pulpitis painful?  
Int Endod J 2002;**35**(10):829-32.

**MILLER SO, JOHNSON JD, ALLEMANG JD et STROTHER JM.**

Cold testing through full-coverage restorations.  
J Endod 2004;**30**:695-700.

**MIWA Z, IKAWA M, IJIMA H et coll.**

Pulpal blood flow in vital and non vital young permanent teeth measured by transmitted-light photoplethysmography: a pilot study.  
Pediatr Dent 2002;**24**(6):594-598.

**MUSSELWHITE J, KLITZMAN B, MAIXNER W et BURKES E.**

Laser Doppler Flowmetry: a clinical test of pulpal vitality.  
Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 1997;**84**:411-419.

**MYERS JW.**

Demonstration of a possible source of error with an electric pulp tester.  
J Endod 1998;**24**:199-200.

-N-

**NAM KC, AHN SH, CHO JH et coll.**

Reduction of excessive electrical stimulus during electric pulp testing.  
Int Endod J 2005a;**38**:544-549.

**NAM KC, LEE SJ, SONG CG et KIM DW.**

Automatic stimulus breaker for electric dental pulp tester using pain response.  
Med Biol Eng Comput 2005b;**43**(3):375-378.

**NANCI A.**

Dentin-pulp complex.  
In: TEN CATE'S. Oral histology. Development, structure and function. 7<sup>th</sup> Ed.  
St. Louis, Missouri: Mosby-Year Book, 2007.

**NEWTON CW, HOEN MM, GOODIS HE, JOHNSON BR et MCCLANAHAN SB.**

Identify and determine the metrics, hierarchy, and predictive value of all the parameters and/or methods used during endodontic diagnosis.  
J Endod 2009;**35**(12):1635-44.

**NOSIK AJ.**

Nanophotonics: making the most of photons.  
Nature Nanotechnology 2009;**4**:548-549.

**NUSSTEIN JM et BECK M.**

Comparison of preoperative pain and medication use in emergency patients presenting with irreversible pulpitis or teeth with necrotic pulp.  
Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 2003;**96**:207-214.

-O-

**ÖBERG PA.**

Laser-Doppler flowmetry.  
Biomed Eng 1990;**18**:125-163.

**ODOR T, PITTFORD T et MACDONALD F.**

Effect of probe design and bandwidth on laser Doppler readings from vital and root-filled teeth.  
Med Eng Phys 1996;**18**:359-364.

**OLGART L, GAZELIUS B, LINDH-STROMBERG U.**

Laser Doppler flowmetry in assessing vitality in luxated permanent teeth.  
Int Endod J 1988;**21**:300-6.

**ÖZTÜRK B, ÜSÜMEZ A, ÖZTÜRK N et OZER F.**

*In vitro* assessment of temperature change in the pump chamber during cavity preparation.  
J Prosthet Dent 2004;**91**:436-440.

**OZURK M, DORUK C, OZEC I et coll.**

Pulpal blood flow: effects of corticotomy and midline osteotomy in surgically assisted rapid palatal expansion.  
J Craniomaxillofacial Surg 2003;**31**:97-100.

-P-

**PASCHOTTA R.**

Encyclopedia of Laser Physics and Technology.  
Zürich: Wiley-VCH, 2008.

**PETERS DD, BAUM GARTNER JC et LORTON L.**

Adult pulpal diagnosis. I. Evaluation of the positive and the negative responses to cold and electrical pulp tests.  
J Endod 1994;**20**:506-511.

**PETERSSON K, SÖDERSTRÖM C, KIANI-ANARAKI M et LEVY G.**

Evaluation of the ability of thermal and electrical tests to register pulp vitality.  
Endod Dent Traumatol 1999;**15**:127-131.

**PLANCK M.**

The origin and development of the quantum theory.  
Oxford: The Clarendon press, 1922.

**POLAT S, ER K, AKPINAR KE, POLAT NT.**

The sources of laser Doppler blood-flow signals recorded from vital and root canal treated teeth.  
Arch Oral Biol 2004;**49**:53-7.

**POLAT S, ER K, POLAT NT.**

Penetration depth of laser Doppler flowmetry beam in teeth.  
Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 2005;**100**:125-9.

**PRETTY IA et MAUPOME G.**

A closer look at diagnosis in clinical dental practice: Part 3. Effectiveness of radiographic diagnostic procedures.  
J Can Dent Assoc 2004;**70**(6):388-394.

-R-

**RADHAKRISHNAN S, MUNSHI AK et HEDGE AM.**

Pulse oximetry a diagnostic instrument in pulpal vitality testing.  
J Clin Pediatr Dent 2002;**26**(2):141-145.

**RECHTMAN E, HARRIS A, KUMAR R, CANTOR LB, VENTRAPRAGADA S, DESAI M, FRIEDMAN S, KAGEMANN L et GARZOZI HJ.**

An update on retinal circulation assessment technologies.  
Curr Eye Res 2003;**27**(6):329-43. Review.

-S-

**SAMRAJ RV, INDIRA R, SRINIVASAN MR et KUMAR A.**

Recent advances in pulp vitality testing.  
Endodontology 2003;**15**:14-19.

**SASANO T, ONODERA D et HASHIMOTO K.**

Possible application of transmitted laser light for the assessment of human pulpal vitality. Part 2. Increased laser power for enhanced detection of pulpal blood flow.  
Dent Traumatol 2005;**21**:37-41.

**SATO M, HARADA K, OKADA Y et OMURA K.**

Blood flow change and recovery of sensibility in the maxillary dental pulp after a single-segment Le Fort I osteotomy.  
Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod 2003;**95**: 660-664.

**SERDYUK I, ZACCAI N, ZACCAI J, ZACCAI G.**

Methods in molecular biophysics: structure, dynamics, function.  
Cambridge: Cambridge Press University, 2007.

**SHETH SA, NEMOTO M, GUIOU MW, WALKER MA et TOGA AW.**

Spatiotemporal evolution of functional hemodynamic changes and their relationship to neuronal activity.  
J Cerebral Blood Flow Metabolism 2005;**25**(7):830-841.

**SILFVAST WT.**

Laser fundamentals.

Cambridge: Cambridge Press University, 2004.

**SOO-AMPON S, VONGSAVAN N, SOO-AMPON M, CHUCKPAIWONG S, MATTHEWS B.**

The sources of laser Doppler blood-flow signals recorded from human teeth.

Arch Oral Biol 2003;**48**:353-60.

**STOYNEVA Z.**

Laser Doppler-recorded venoarteriolar reflex in Raynaud's phenomenon.

Autonomic Neuroscience 2004;**116**:62-68.

**STROBL H, HAAS M, NORER B et coll.**

Evaluation of pulpal blood flow after tooth splinting of luxated permanent maxillary incisors.

Dent Traumatol 2004;**20**:36-41.

**SUPPA P, RUGGERI A Jr, TAY FR et coll.**

Reduced antigenicity of type I collagen and proteoglycans in sclerotic dentin.

J Dent Res 2006;**85**:133-137.

-T-

**TANG GM, CHANG DS, SARKAR R, WANG R et MESSINA LM.**

The effect of gradual or acute arterial occlusion on skeletal muscle blood flow, arteriogenesis, and inflammation in rat hindlimb ischemia.

J Vasc Surg 2005;**41**:312-320.

**TECLES O, LAURENT P, ZYGOURITSAS S, BURGER AS, CAMPS J, DEJOU J et ABOUT I.**

Activation of human dental pulp progenitor/stem cells in response to odontoblast injury.

Arch Oral Biol 2005;**50**:103-108.

**TEN CATE AR, BARTOLD PM, SQUIER CA et NANJI A.**

Repair and regeneration of oral tissues.

In: TEN CATE'S. Oral histology. Development, structure and function. 7<sup>th</sup> Ed.

St. Louis, Missouri: Mosby-Year Book, 2007.

**TORABINEJAD M ET WALTON RE.**

Endodontics (4th Edition).

Iowa City: Saunders, 2008.

**TROWBRIDGE HO.**

Pulp biology: progress during the past 25 years.

Aust Endod J 2003;**29**(1):5-12.

-V-

**VONGSAVAN N et MATTHEWS B.**

Experiments on extracted teeth into the validity of using laser Doppler techniques for recording pulpal blood flow.

Arch Oral Biol 1993;**38**:431-9.

**VONGSAVAN N et MATTHEWS B.**

Experiments in pigs on the sources of laser Doppler blood-flow signals recorded from teeth.

Arch Oral Biol 1996;**41**:97-103.

**VREVEN J et NOËL H.**

Pulpite et nécrose pulpaire.

In : PIETTE E et GOLDBERG M. La dent normale et pathologique.

Bruxelles : De Boeck Université, 2001.

-W-

**WEINE FS.**

Endodontic therapy. 6th ed.

St. Louis: Mosby, 2004.

**WHITTINGHAM TA.**

Medical diagnostic applications and sources  
Prog Biophys Mol Biol 2007;**93**:84-110.

**WILSON TE, ZHANG R, LEVINE BD et CRANDALL CG.**

Dynamic autoregulation of the cutaneous circulation: differential control in glabrous vs. non-glabrous skin.  
Am J Physiol Heart Circ Physiol 2005;**289**(1):385-391.

-Y-

**YOSIPOVITCH G, SACKETT-LUNDEN L, GOON A ; YIONG HUAK C, LEOK GOH C et HAUST E.**

Circadian and Ultradian (12 h) Variations of Skin Blood Flow AND Barrier Function in Non-Irritated and Irritated Skin –  
Effect of Topical Corticosteroids.  
J Invest Dermatol 2004;**122**:824-829.

## TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Absorption d'un rayonnement de fréquence F par un atome et dénomination des différentes couches et sous-couches atomiques (d'après Nozic, 2009). .....	10
Figure 2 : Principe de désexcitation émissive spontanée d'un atome excité .....	11
Figure 3 : Principe de désexcitation émissive induite d'un atome excité (d'après Paschotta, 2008).....	12
Figure 4 : Principe de fonctionnement d'un laser (d'après Paschotta, 2008). .....	13
Figure 5 : Interactions laser/matière.....	18
Figure 6 : L'effet Doppler traduit une modification de la longueur d'onde d'une source vibratoire lorsqu'elle est en mouvement ou qu'elle percute un objet mobile. ....	19
Figure 7 : Vélocimétrie Doppler à émission continue.....	21
Figure 8 : Effet Doppler appliqué au rayonnement laser (Jafarsadeh, 2009).....	23
Figure 9 : Formation de dentine sclérotique (coupe non décalcifiée, microscopie photonique). .....	30
Figure 10 : Les différents processus de fermeture des tubuli dentinaires. A : précipitation cristalline (microscopie électronique à transmission), B : minéralisation en présence de bactéries (microscopie électronique à transmission), C : exacerbation de la dentine péritubulaire (microscopie électronique à balayage). ....	30
Figure 11 : Formation de dentine réactionnelle (coupe décalcifiée colorée, microscopie photonique).....	31
Figure 12 : La ligne calciotraumatique (coupe décalcifiée colorée, microscopie photonique). .....	31
Figure 13 : Tractus morts (coupe non décalcifiée, microscopie photonique). ....	32
Figure 14 : Classification de BAUME (Baume et Fiore-Donno, 1962).....	34
Figure 15 : Terminaisons nerveuses au sein des tubuli dentinaire (microscopie électronique à balayage) (Jean et coll., 1986).....	41
Figure 16 : Vascularisation terminale pulpaire (coupe histologique décalcifiée colorée, microscopie photonique). ....	53
Figure 17 : Equipement nécessaire aux enregistrements simultanés du flux sanguin pulpaire et de l'ECG (Musselwhite et coll., 1997). ....	61
Figure 18 : Enregistrement en fluxmétrie laser Doppler réalisé sur une incisive centrale vitale (a) et ECG correspondant (b) (Gazelius et coll., 1986).....	61
Figure 19 : Enregistrement en fluxmétrie laser Doppler réalisé sur une incisive vitale. Une injection d'1 mL de lidocaïne (20mg/mL) additionnée d'adrénaline (12,5µg/L) est réalisée. (a) marque le début de l'injection et (b) la fin de l'injection (Gazelius et coll., 1986). ....	62
Figure 20 : Enregistrement en fluxmétrie laser Doppler d'une dent vitale (courbe supérieure) et d'une dent nécrosée (courbe inférieure) (Olgart et coll., 1988). ....	64
Figure 21 : Enregistrement en fluxmétrie laser Doppler d'une dent vitale (courbe gauche) et d'une dent nécrosée (courbe droite) (Ingolfsson et coll., 1994).....	64
Figure 22 : Temps écoulé après le traumatisme dans différentes études avant d'obtenir une réponse positive aux différents tests effectués. ....	66
Figure 23 : Unité principale du fluxmètre laser Doppler : Periflux System 5000 (PERIMED, Suède).....	69
Figure 24 : Extrémité métallique de la sonde optique : modèle 407-2 (PERIMED, Suède). ..	70
Figure 25 : Solution de calibrage du fluxmètre laser Doppler. ....	71
Figure 26 : Calibrage en cours (affichage de l'unité principale).....	71

Figure 27 : Fin de la procédure de calibrage. La valeur de la solution fournie par PERIMED est de 250 ( $\pm 15$ ) PU.....	72
Figure 28 : Support destiné à vérifier la valeur « 0 ».....	72
Figure 29 : Fin de calibrage : la valeur « 0 » ( $\pm 0,5$ ) est contrôlée. ....	73
Figure 30 : Le champ opératoire est constitué d'un écarteur à photographies, de rouleaux de coton salivaires et d'une pompe à salive.....	74
Figure 31 : Schéma montrant la position de la sonde optique sur une vue vestibulaire et une vue mésiale.....	75
Figure 32 : Photographie clinique intrabuccale montrant la sonde optique sur la face vestibulaire d'une I1.....	75
Figure 33 : Enregistrement du flux sanguin pulpaire d'une incisive centrale maxillaire droite vitale en temps réel.....	77
Figure 34 : Enregistrement du flux sanguin pulpaire présenté Fig. 33 compressé par le logiciel Perisoft.....	78
Figure 35 : Traitement des données de ce même enregistrement par le logiciel Perisoft (PERIMED, Suède).....	78
Figure 36 : Enregistrements par fluxmétrie laser Doppler, exprimés en valeurs numériques, des valeurs moyennes des flux sanguins pulpaire d'incisives maxillaires vitales (n=52).....	80
Figure 37 : Exemples d'enregistrements compressés de flux sanguin pulpaire de deux incisives maxillaires vitales.....	81
Figure 38 : Séries de 10 enregistrements (exprimés en PU) chez le premier sujet.....	83
Figure 39 : Valeurs numériques relevées par fluxmétrie laser Doppler des trois séries d'enregistrement représentées Fig. 38.....	83
Figure 40 : Séries de 10 enregistrements (exprimés en PU) chez le second sujet.....	84
Figure 41 : Valeurs numériques relevées par fluxmétrie laser Doppler des deux séries d'enregistrement représentées Fig. 40.....	84
Figure 42 : Variations, en fonction de l'élévation de la température de la pièce, des valeurs numériques (exprimées en PU) enregistrées toutes les 30 minutes à partir de la solution de calibrage et du disque de calibrage.....	86
Figure 43 : Radiographie rétroalvéolaire des incisives de l'étudiant sur lequel les enregistrements ont été réalisés.....	92
Figure 44 : Enregistrements du flux sanguin pulpaire d'une dent vitale (I1) et d'une dent obturée (I2).....	94
Figure 45 : Séries de 5 enregistrements (exprimés en valeurs numériques) par fluxmétrie laser Doppler d'une incisive centrale maxillaire vitale (V) et d'une incisive centrale maxillaire obturée (O).....	94
Figure 46 : Valeurs numériques relevées par fluxmétrie laser Doppler des séries d'enregistrements représentées Fig. 45.....	95
Figure 47 : Enregistrements par fluxmétrie laser Doppler des flux sanguins pulpaire d'incisives maxillaires obturées et vitales (contrôles) sur 5 étudiants (exprimés en valeurs numériques).....	97
Figure 48 : Valeurs en PU des enregistrements par fluxmétrie laser Doppler des incisives maxillaires obturées et vitales (contrôles) sur chacun des 5 étudiants testés.....	97
Figure 49 : Enregistrement des courbes de vitesse des hématies par fluxmétrie laser Doppler.....	99
Figure 50 : Représentation schématique de l'organisation des principaux groupes de fibres du ligament alvéolo-dentaire.....	103
Figure 51 : Schéma représentant une extrusion (d'après Marcano et Berna, 1999).....	104
Figure 52 : Schémas représentant des luxations latérales sans fracture alvéolaire (A) et avec fracture alvéolaire (B) (d'après Marcano et Berna, 1999).....	106

Figure 53 : Tableau récapitulatif des traumatismes inclus dans l'étude. ....	111
Figure 54 : Tableau récapitulatif des résultats obtenus avec les tests de sensibilité et les courbes de vitesse des hématies. ....	113
Figure 55 : Enregistrement, par fluxmétrie laser Doppler, non interprétable de la courbe de vitesse des hématies d'une dent luxée. ....	114
Figure 56 : Comparaison des courbes de vitesse des hématies enregistrées par fluxmétrie laser Doppler et des tests de sensibilité conventionnels chez des patients présentant des dents luxées (n=24). ....	114

**PUBLICATIONS EN RAPPORT  
AVEC LA THESE**

## Evaluation of the ability of laser Doppler flowmetry for the assessment of pulp vitality in general dental practice

Elisabeth Roy, DDS,<sup>a</sup> Brigitte Alliot-Licht, PhD,<sup>b</sup> Sylvie Dajeau-Trutaud, PhD,<sup>a</sup> Christine Fraysse, PhD,<sup>a</sup> Alain Jean, PhD,<sup>a\*</sup> and Valerie Armengol, PhD,<sup>a\*</sup> Nantes, France  
UNIVERSITY NANTES AND CHU NANTES

**Objectives.** In this study we investigated pulpal blood flow (PBF) values and moving blood cell velocity (MBCV) curves recorded by laser Doppler flowmetry (LDF) for pulpal vitality diagnosis in general dental practice and to compare MBCV curves to standard diagnostic tests in traumatology.

**Study design.** LDF tests performed with the PeriFlux System 5000 were applied to vital and nonvital (endodontic treatment) teeth of healthy students (n = 52) and on 24 luxated teeth of patients.

**Results.** The PBF values were not reproducible and no statistically significant differences were observed between vital and nonvital teeth. MBCV curves in contrast could distinguish between the 2 tooth types. Tests on luxated teeth showed that while 62.5% of MBCV curves correlated with conventional vitality tests, only 12.5% of MBCV curves could help in vital diagnosis.

**Conclusion.** When applied to luxated teeth, the MBCV curve appeared to be accurate when the standard vitality tests indicated a nonvital diagnosis. (*Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod* 2008;106:615-20)

Therapeutic decisions in dental traumatology are made using the 3 principal means of pulp diagnosis: clinical examination, pulp sensitivity tests, and radiography.<sup>1-3</sup> These methods are simple and practical but they do not provide a precise differential diagnosis of the vascularization state of the pulp parenchyma.<sup>1,4</sup> For these reasons, root canal treatments could be inopportunistically decided. It is therefore important to find a tool to assist in the pulp diagnosis and consequently to aid in the appropriate treatment.<sup>5</sup>

Laser Doppler flowmetry (LDF) was introduced in dentistry in the late 1980s.<sup>6,7</sup> This technique has been developed in many medical disciplines to assess blood flow in intact microvascular systems, such as the retina, renal cortex, and skin.<sup>7-9</sup> The laser Doppler measures the flow of blood cells inside a tissue without causing the slightest deterioration of this tissue.<sup>10</sup> Blood cells moving within the volume, illuminated by the beam, will cause the light to change frequency. This change in frequency is called a Doppler shift. Part of the light within the tissue is scattered back to the probe and

returned from there via an optical fiber to a photo detector in the instrument where it is converted into electrical signals. Blood perfusion is a relative value expressed in arbitrary measurement units, the Perfusion Unit (PU). This represents the product of the relative number of moving blood cells, which causes Doppler shift, and the relative velocity of these cells in the measured volume.<sup>5,7,10</sup>

The efficacy of LDF has been extensively studied in dental traumatology and maxillofacial surgery for the diagnosis of pulp vitality<sup>11-13</sup> but the results observed are contradictory. Several authors suggest that LDF can distinguish teeth with necrotic pulp from teeth with vital pulp,<sup>14</sup> but others demonstrate that LDF is not a reliable method for assessing pulpal vitality.<sup>15,16</sup> These authors show that the signal recorded from a tooth is not only derived from the pulp, but also from periodontal tissues.<sup>15,16</sup> Today, LDF is not yet a conventional test in dentistry and it is difficult to form an objective opinion of the real relevance of LDF for dentists in general practice. However, although most studies insist on the numerical values expressed in PU that are indicative of the pulp blood flow (PBF), LDF also provides other data, such as the moving blood cell velocity curve that is a useful element for pulp vitality diagnosis. The aim of the present study realized in general dental practice conditions, was first to evaluate whether the moving blood cell velocity (MBCV) curve recorded by laser Doppler flowmetry could provide a better method for pulpal vitality diagnosis than the numerical values of the PBF (expressed in PU) and sec-

<sup>a</sup>Université de Nantes, CHU de Nantes, ERT1051, Equipe de Recherche Clinique en Odontologie, Faculté de Chirurgie Dentaire, Nantes, France.

<sup>b</sup>Université de Nantes, CHU de Nantes, INSERM, U 791, Laboratory for Osteo-articular and Dental Tissue Engineering, Nantes, France.

\*These authors contributed equally as senior investigators.

Received for publication Feb 11, 2008; returned for revision May 13, 2008; accepted for publication May 15, 2008.

1079-2104/\$ - see front matter

© 2008 Mosby, Inc. All rights reserved.

doi:10.1016/j.tripleo.2008.05.035



Elisabeth ROY<sup>(1)</sup>  
Valérie ARMENGOL<sup>(2)</sup>  
Christine FRAYSSÉ<sup>(3)</sup>  
Alain JEAN<sup>(3)</sup>

# Le laser doppler en odontologie

Tests préliminaires effectués  
avec le Système Periflux 5000 (Perimed, Suède)

## Laser doppler in dentistry

Preliminary tests carried out with the Periflux System 5000 (Perimed, Sweden)

### Résumé

Les décisions thérapeutiques en Odontologie, et notamment en Traumatologie, s'appuient sur la radiographie, le changement de teinte de la dent, et les tests de vitalité pulpaire, improprement qualifiés car ils sont en réalité des tests de sensibilité. Ces techniques présentent des limites et surtout, elles ne sont en aucun cas un témoin direct de l'état de vascularisation du parenchyme pulpaire. Cet état des lieux a encouragé les odontologistes à développer une méthode sensible, spécifique, objective, reproductible et non invasive. La Fluxmétrie par Laser Doppler est à ce jour la seule technique, décrite dans la littérature et répondant à ces critères, qui permet d'évaluer la vitalité correspondant à la perfusion sanguine de la pulpe dentaire. Le système Periflux 5000 de PERIMED est utilisé depuis peu en Odontologie au CHU de Nantes. La mise en œuvre de l'appareil, le protocole d'utilisation choisi et les premiers résultats obtenus chez des sujets sains sont décrits ici. Ces résultats confirment l'efficacité de la fluxmétrie laser doppler pour distinguer une pulpe vitale d'une pulpe nécrosée. Néanmoins des difficultés ont été rencontrées dans les tests effectués. Elles concernent la reproductibilité des valeurs enregistrées et sont sans doute liées aux nombreux paramètres susceptibles d'interagir avec la microvascularisation pulpaire et les conditions d'enregistrement.

### Mots-clés :

Vitalité pulpaire ; flux sanguin pulpaire ; fluxmétrie Laser Doppler.

### Summary

*Therapeutic decisions in Dentistry, moreover in traumatology, are based on X-rays, teeth color changes and pulp vitality tests, which are in reality only sensitivity tests. These methods reflect however, in no way, the state of vascularisation of the pulp.*

*Dentists were thus encouraged to determine a more specific, objective, sensitive, reproducible and non invasive method. Laser Doppler Flowmetry is the only technique responding to above criteria, according to literature. Laser Doppler Flowmetry evaluates tooth vitality by analyzing blood pulp perfusion. Perimed's Periflux 5000 has been recently introduced to the dentistry department of Nantes University Hospital (CHU de Nantes).*

*The use of the apparatus, the protocol adopted and the first results obtained are described below. These results confirm that Laser Doppler Flowmetry can effectively distinguish a vital pulp from necrosed pulp.*

*But several obstacles were encountered during testing, mainly concerning reproducible test values. This is most probably due to numerous parameters interfering with pulp micro-vascularisation and registering conditions.*

### Key-words:

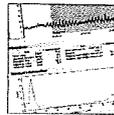
*Pulp vitality test; pulpal blood flow; Laser Doppler Flowmetry.*

<sup>(1)</sup>AHU-PH,

<sup>(2)</sup>MCU-PH,

<sup>(3)</sup>PU-PH,

Faculté de Chirurgie dentaire de Nantes, France



Elisabeth ROY<sup>(1)</sup>  
 Brigitte ALLIOT-LICHT<sup>(2)</sup>  
 Christine FRAYSSÉ<sup>(3)</sup>  
 Alain JEAN<sup>(1)</sup>  
 Valérie ARMENGOL<sup>(1)</sup>  
 Sylvie DAJEAN-TRUDAUD<sup>(3)</sup>

# Intérêt de l'enregistrement de la courbe de vitesse des hématies par fluxmétrie laser doppler dans le diagnostic pulpaire en traumatologie

## Reliability of moving blood cells velocity analysed by laser doppler flowmetry for the assessment of pulp vitality in dental traumatology

### Résumé

Les décisions thérapeutiques en traumatologie s'appuient sur la radiographie, le changement de teinte de la dent et les tests de vitalité pulpaire. Ces techniques ne sont en aucun cas un témoin direct de l'état de vascularisation pulpaire. La Fluxmétrie Laser Doppler mesure le flux des cellules sanguines (exprimé en PU) à l'intérieur d'un tissu sans provoquer d'altération de celui-ci. Le flux sanguin est proportionnel au produit de la vitesse des hématies par leur concentration. L'objectif de notre étude a été d'évaluer si la courbe de vitesse des hématies enregistrée par le laser Doppler pouvait être une meilleure méthode de diagnostic pulpaire que les valeurs numériques du flux sanguin pulpaire. Puis, nous avons comparé la courbe de vitesse des hématies aux tests de vitalité pulpaires conventionnels chez des patients présentant des dents luxées. Les valeurs numériques mesurées n'ont pas été reproductibles. Les courbes de vitesse des hématies ont, en revanche, permis de distinguer les dents vitales des dents non vitales. Sur les dents traumatisées, la courbe de vitesse des hématies a pu permettre de diagnostiquer une pulpe vitale quand les tests de vitalité conventionnels étaient négatifs.

### Summary

*Therapeutic decisions in Dentistry, moreover in traumatology, are based on X-rays, teeth color changes and pulp vitality tests. These methods reflect however, in no way, the state of vascularisation of the pulp. Laser Doppler flowmetry measures the flow of blood cells (expressed in PU) inside a tissue without causing the slightest deterioration of this tissue. Blood perfusion is a relative value which represents the product of the relative number of moving blood cells and the relative velocity of these cells in the measured volume. In this study we investigated pulpal blood flow values and moving blood cells velocity curves recorded by Laser Doppler Flowmetry for pulpal vitality diagnosis in general dental practice and to compare moving blood cells velocity curves to standard diagnostic tests in traumatology. The pulpal blood flow values were not reproducible. Moving blood cells velocity curves in contrast could distinguish between vital and non vital teeth. When applied to luxated teeth, the moving blood cells velocity curve appeared to be accurate when the standard vitality tests indicated a non vital diagnosis.*

Référence de l'article : ROY E., ALLIOT-LICHT B., FRAYSSÉ C., JEAN A., ARMENGOL V., DAJEAN-TRUDAUD S.

Intérêt de l'enregistrement de la courbe de vitesse des hématies par fluxmétrie laser doppler dans le diagnostic pulpaire en traumatologie.  
 Rev. Francoph. Odontol. Pediatr. 2008 ; 3 (4) : 153-158

### Mots clés :

Vitalité pulpaire ; flux sanguin pulpaire ;  
 Fluxmétrie Laser Doppler.

### Key-words:

Pulp vitality; pulpal blood flow;  
 Laser Doppler Flowmetry.

<sup>(1)</sup>Univ Nantes, ERT1051,  
 Equipe de Recherche  
 Clinique en Odontologie

<sup>(2)</sup>AINSERM, U 791,  
 Laboratory for  
 Osteo-articular and Dental  
 Tissue Engineering

Faculté de Chirurgie  
 dentaire de Nantes,  
 Pôle Odontologie  
 CHU Nantes.

<sup>(3)</sup>Faculté de Chirurgie  
 dentaire de Nantes,  
 Pôle Odontologie  
 CHU Nantes.

Correspondance : Docteur Elisabeth Roy - roy.elisabeth@gmail.com - Tél. 06 13 28 11 94

Faculté de Chirurgie dentaire de Nantes - 1 place Alexis Ricordeau - BP 84215 44042 Nantes Cedex 1