

IMAGERIE EN IMPLANTOLOGIE ORALE

Dr Norbert BELLAICHE*

L'imagerie est devenue un élément déterminant du bilan pré-opératoire en implantologie orale.

Les différentes techniques d'imagerie utilisées dans cette indication sont les suivantes :

-les techniques de radiologie conventionnelle, comprenant:

.radiographie **panoramique**

.et clichés rétro-alvéolaires **long-cône**

-et les techniques d'imagerie tridimensionnelle (**Imagerie 3D**), avec :

.la tomographie à faisceau conique (**cone beam**), méthode d'imagerie tridimensionnelle devenue la méthode de référence en implantologie orale,

.et la tomодensitométrie ou **scanner** dont les indications reposent sur les limites de la précédente méthode;

.la **simulation implantaire** (Simplant*, Nobleguide*...) et la **navigation robotique** (Robodent*...) sont des applications de l'imagerie 3D.

Toutes ces techniques ne nous semblent pas concurrentes mais complémentaires dans le cadre de la chirurgie implantaire. Nous tenterons dans cette étude d'exposer, pour chaque technique : son principe, ses avantages et inconvénients afin d'en dégager les indications.

LES TECHNIQUES DE RADIOLOGIE CONVENTIONNELLE:

LA RADIOGRAPHIE PANORAMIQUE

C'est l'examen de première intention, **indispensable mais le plus souvent insuffisant**.

■ **Le principe est celui de la tomographie courbe** qui résulte d'un mouvement simultané et en sens inverse de la source de rayons X et du film radiographique au cours d'une rotation, réalisant une coupe tomographique relativement épaisse (zonographie) incluant les deux arcades sur une même image dite panoramique.

■ **Avantages :**

• Obtention sur un seul cliché de la totalité du système dento-maxillaire .

• Estimation approximative de la **hauteur** d'os, compte-tenu d'un agrandissement vertical constant, d'environ 1.20, pouvant être nul (grandeur nature) en panoramique numérisé.

• Coût relativement bas.

■ **Inconvénients :**

• Dimensions mésio-distales non fiables car très variables d'un examen à l'autre en fonction de la morphologie du maxillaire et de la position du patient.

• Dimension vestibulo-linguale ignorée.

• Par ailleurs, la radio panoramique est **une tomographie**, limitée par son épaisseur, de 10 à 12 mm dans les régions postérieures et de 6 à 10mm parfois dans les régions antérieures; ceci explique que seules les structures incluses dans cette coupe tomographique soient nettes, que les incisives soient souvent floues, que l'étude des sinus soit impossible par cette technique, et enfin que des structures anatomiques importantes tels le trou mentonnier ou le canal mandibulaire voire un kyste ou une racine résiduelle puissent passer inaperçues.

• En cas d'agrandissement des dimensions en hauteur (1,20), nécessité, pour des mesures directes de l'utilisation d'une règle spéciale graduée à l'échelle de l'agrandissement.

▪ Enfin, comme toute **méthode conventionnelle**, le panoramique ne permet pas d'apprécier la qualité de l'os spongieux, le noircissement obtenu étant fonction des doses émises, l'épaisseur du processus alvéolaire, la situation en profondeur des obstacles tels le sinus ou le canal mandibulaire ou la qualité de l'os spongieux.

LE BILAN RETRO-ALVEOLAIRE LONG-CÔNE permet

• l'obtention d'images 2D sans déformation,

• une approche de la hauteur d'os

• et une étude mésiodistale **plus fiables que sur le panoramique**.

Au total : Ces techniques d'imagerie conventionnelle apparaissent **d'intérêt limité** tant pour l'étude du volume osseux disponible, que surtout pour l'étude de la qualité de l'os, le noircissement obtenu étant, pour ces techniques, dépendant de la dose émise et donc variable d'un examen à l'autre.

*Radiologue, Paris.

LA TOMOGRAPHIE A FAISCAU CONIQUE (CONE BEAM)

Depuis l'apparition de la tomographie à faisceau conique (cone beam), les indications du scanner traditionnel (tomodensitométrie) ont été remises en question en ce qui concerne l'exploration du massif facial. Certains ont préconisé l'abandon pur et simple de la tomodensitométrie en pathologie maxillo-faciale, tandis que d'autres ont préféré rester fidèles au scanner dans certaines indications, optimisant son utilisation en diminuant la dose émise, qui s'avère acceptable dans des conditions particulières (scanner 64 barrettes, tension, temps de pose et intensité minima). Le scanner, qui reste incontournable dans certaines indications et le cone beam, examen de première intention et de référence en implantologie, peuvent donc être considérés comme complémentaires dans la panoplie diagnostique de l'imagerie maxillo-faciale.

PRINCIPE ET TECHNIQUE DU CONE BEAM

ACQUISITION DES DONNEES

■ **Le faisceau de rayons X, de forme conique, traverse l'objet** à explorer avant d'être analysé après atténuation par un système de détection. Le tube et le système de détection tournant autour du sujet (192 à 360° selon les constructeurs), plusieurs centaines d'analyses (prises de vues) sont réalisées dans les différents plans de l'espace, permettant après transmission des données à un ordinateur, la reconstruction volumique d'un cube ou d'un cylindre contenant l'objet (ici, les maxillaires). Le volume étudié est composé de voxels dont le côté est de la taille d'un pixel, mesuré en mm ou microns (μm).

■ **Le système de détection et de transmission des données** diffère selon les machines. Le premier système utilisé comprenait essentiellement un amplificateur de brillance (Newtom3G*, Galileos Sirona*). Le système utilisé le plus souvent est aujourd'hui le **capteur plan** (Newtom VG*, Accuitomo Morita*, Icat*...). La comparaison des deux systèmes suggère un chemin plus court et plus simple du signal pour le système à capteur plan, qui pourrait pour certains expliquer en partie la meilleure résolution observée avec les machines employant ce type de capteur.

RECONSTRUCTIONS D'IMAGES

Les données de l'examen sont reconstruites dans le plan axial et transmises aux consoles de reconstruction au format **DICOM** (Digital Imaging and Communication in Medicine). Ces données axiales sont exploitées en implantologie par deux types de logiciel, les logiciels de Reconstruction « dentascanner », adaptés aux mesures des volumes en implantologie (Dentascan*, Simplant* et tous logiciels de simulation implantaire) et les logiciels de Reconstruction Multiplanaires utiles pour l'exploration de tout type de pathologie.

■ **LOGICIELS DE RECONSTRUCTIONS « DENTASCANNER »** Ils permettent d'obtenir des reconstructions verticales dans l'axe des dents et des implants envisagés, et donc des mesures fiables en épaisseur et en hauteur.

● **Les reconstructions axiales** sont réalisées selon le plan occlusal.

● **Les reconstructions bidimensionnelles** comprennent des reconstructions parallèles et perpendiculaires et à la courbure des maxillaires.

● **Les reconstructions panoramiques sont parallèles** à la ligne tracée, donc à la courbure du maxillaire.

Aucune mesure n'est à réaliser sur ces « panoramiques » qui ne constituent que des images de "repérage" pour les reconstructions perpendiculaires.

● **Les reconstructions perpendiculaires** à la courbure des maxillaires (reconstructions coronales obliques ou orthogonales...) sont affichées automatiquement par l'ordinateur du scanner à partir d'une ligne tracée parallèlement à cette courbure, au niveau du collet des dents. Elles sont en général pratiquées tous les mm. Les images étant reproduites grandeur nature (échelle 1/1), on peut mesurer l'épaisseur et la hauteur de l'os disponible avec une simple règle graduée sur chaque image de reconstruction perpendiculaire. On peut aussi utiliser des calques de la silhouette des implants, fournis par les producteurs d'implants, à l'échelle 1/1 (grandeur nature).

● **Les reconstructions tridimensionnelles**, sont de plusieurs types :

● **Les reconstructions en rendu de surface** ont un intérêt limité en implantologie. Elles sont utiles en cas de perte de substance importante, pour apprécier son volume et sa forme avant greffe et surtout en pathologie congénitale malformative et en traumatologie, pour mettre en évidence les fractures et les déplacements complexes.

● **Les reconstructions en « rendu de volume »**, d'opacité variable, permettent de visualiser en trois dimensions les rapports d'implants simulés avec les obstacles, les autres implants et les dents.

■ **LOGICIELS DE RECONSTRUCTIONS MULTIPLANAIRES** : Equipant tous les cone beam et scanners, ils permettent l'obtention, à partir des **données axiales**, de **reconstructions strictement frontales et sagittales** ainsi que **tridimensionnelles**. Ils sont plus précis que le Dentascanner pour le diagnostic des pathologies fines.

AVANTAGES DU CONE BEAM

Théoriquement, le cone beam présente, par rapport au scanner, l'intérêt d'une moindre irradiation. En pratique, ceci dépend d'une part de l'appareil cone beam considéré et d'autre part du protocole, voire du type de scanner envisagé. Certains appareils cone beam s'avèrent en effet plus irradiants qu'un scanner réalisé dans les conditions optimales.

■ **DOSE EFFICACE EN CONE BEAM** L'irradiation par un faisceau conique s'accompagnant d'un rayonnement diffusé plus important qu'au scanner, le calcul de la dose efficace repose sur l'utilisation d'un protocole plus complexe, fondé sur l'utilisation d'un « fantôme » comportant des dosimètres thermoluminescents positionnés à l'emplacement exact des organes irradiés (thyroïde, glandes salivaires, cristallins...). Le dosage de la dose efficace dans chacun des organes irradiés (par mesure, après irradiation, des doses dans les différents dosimètres) et la somme de chaque dose efficace par organe pour obtenir la dose efficace totale. En conséquence, la dosimétrie du cone beam devrait être exprimée en microSieverts (μSv).

■ **OPTIMISATION DE LA DOSIMETRIE EN CONE BEAM** Elle comporte, comme au scanner :

● **Justification:** Tout examen devrait être réalisé après avoir été justifié pour chaque patient, afin de tenter de s'assurer que les avantages de l'examen l'emportent sur les risques. Les examens cone beam ne devraient pas être répétés en routine, sans qu'une nouvelle évaluation «avantages versus risques» n'ait été réalisée.

● **Optimisation: Dose limitée** à la plus petite nécessaire et suffisante pour le diagnostic recherché (principe ALARA: As Low As Reasonable Achievable). La dose délivrée devrait ainsi être limitée en implantologie. En outre, comme pour le scanner, le type et même la marque voire le modèle de cone beam peuvent influencer grandement sur la dose émise.

ARTEFACTS ET LIMITES DU CONE BEAM

■ ARTEFACTS

● **Cinétiques:** Ils sont plus fréquents qu'au scanner du fait des temps de pose plus longs (jusqu'à 30 secondes pour le Newtom 5G* et le Morita Accuitomo*). Une contention fiable est donc indispensable en cone beam. Ils sont dus aux mouvements du patient lors de la réalisation des coupes axiales. Ils se traduisent par une irrégularité des contours du procès alvéolaire sur les reconstructions, et sont responsables de mesures éronnées en hauteur, rendant l'examen inexploitable en implantologie.

● **Métalliques:** Le métal crée des éclats concentriques étendus aux structures voisines ainsi que des stries radiaires détériorant l'image. Ils seraient moins importants sur les cone beam bien calibrés, les appareils mal calibrés pouvant présenter des artefacts « coronaires » encore plus importants et plus gênants qu'au scanner. Les artefacts radiculaires dus aux tenons, inlays core et vis radiculaires sont beaucoup moins gênants qu'en scanner.

■ **LES PIEGES** des images cone beam concernent surtout les reconstructions **panoramiques** : des fausses images de kyste peuvent apparaître sur ces images panoramiques si la ligne de reconstruction passe en région vestibulaire ou linguale. C'est pourquoi ces images panoramiques doivent être utilisées uniquement pour repérer les reconstructions perpendiculaires.

■ **LES LIMITES affectent le cone beam pour sa résolution en densité**, d'où l'étude médiocre des parties molles et des densités. **La résolution spatiale** est moins limitée, l'utilisation de voxels isotropiques de 125 à 75 μm dans les trois plans de l'espace permettant une résolution spatiale meilleure qu'en scanner (NewtomVGI*, Morita*...)

CONCLUSION SUR LE CONE BEAM: L'examen cone beam permet de poser avec rigueur l'**indication** opératoire, évitant les interventions chirurgicales inutiles et permettant a contrario la mise en place d'implants qui paraissaient impossibles sur les seules données du panoramique dentaire. Il permet en outre une **stratégie opératoire** permettant de prévoir au mieux le nombre, la répartition, le diamètre, la longueur et l'orientation optima des implants, en fonction du volume osseux disponible, ainsi que de sa qualité et du projet prothétique. Enfin le cone beam a un intérêt **médico légal** reconnu aujourd'hui. Le « cone beam » est considéré comme la **technique d'imagerie 3D de référence en implantologie**. Cependant, la multiplication des appareils « cone beam » dans les cabinets dentaires devrait être soumise à une maîtrise codifiée de son usage afin d'éviter les abus de l'autoprescription qui pourrait se traduire par une augmentation significative de l'irradiation de la population en pratique médicale.

LE SCANNER ou tomodensitométrie (TDM) s'avère utile en implantologie dans certaines conditions.

PRINCIPE ET TECHNIQUE DU SCANNER

■ **PRINCIPE** L'image tomodensitométrique fait appel aux rayons X et repose sur l'absorption différentielle du rayonnement par les différentes structures anatomiques traversées.

Le faisceau de rayons X est étroitement collimaté, réalisant des coupes fines (0,5 à un mm d'épaisseur) du sujet traversé (ici les maxillaires). Les récepteurs du rayonnement sont constitués par des détecteurs électroniques qui transforment le rayonnement en signal électrique, lui-même traduit en information numérique traitée par ordinateur. Le scanner est donc un densitomètre qui a pour fonction de mesurer des densités, exprimées en unités Hounsfield (UH). Les structures denses apparaissent blanches car elles atténuent beaucoup les rayons X. L'air apparaît noir car il n'atténue pas du tout les rayons X. Les tissus mous (graisses, peau, muscles) apparaissent gris car ils atténuent modérément et de façon variable les rayons X.

Si nous mesurons la densité des structures représentées dans une coupe scanographique:

- **le noir**: représente l'air, aux environs de -1000 UH;

- **les gris** figurent :

 - les parties molles (peau, graisse, muscles) : entre -100 et +100 UH;

 - l'os spongieux : entre -100 et +1000 UH environ.

- **les blancs** sont en rapport avec :

 - l'os cortical, de +800 à +2000 UH environ;

 - l'email et le métal, de +1500 à +3000 UH.

■ TECHNIQUE DU SCANNER

■ REALISATION DU SCANNER

- **Les coupes axiales** (perpendiculaires à l'axe du corps) sont réalisées selon un plan parallèle au plan occlusal en cas d'édentement antérieur et/ou étendu, ou au plan basilaire pour les édentements mandibulaires postérieurs. Les coupes sont infra-millimétriques (0,5 à 0,6mm), jointives ou mieux chevauchées, repérées sur un topogramme de profil. La «fenêtre» est de type osseux élargi (niveau = +1000 Unités Hounsfield, largeur = 4000 Unités Hounsfield) : le contraste des images obtenues permettra donc d'explorer surtout les structures denses comme l'os et les dents. L'examen d'un maxillaire demande 120 coupes de 0,6mm, du plan occlusal aux planchers orbitaires, incluant l'ensemble des sinus maxillaires jusqu'aux méats moyens. A la mandibule, une centaine de coupes de 0,6mm sont suffisantes en règle. L'utilisation d'un guide radio-chirurgical est préférable, afin de reporter en bouche du patient les constatations issues de l'analyse scanographique, et son usage est de plus en plus fréquent...

- **Les reconstructions bidimensionnelles** comprennent comme en cone beam des reconstructions parallèles et perpendiculaires et à la courbure des maxillaires.

- **Les reconstructions tridimensionnelles** sont du même type aussi.

■ OPTIMISATION DE LA DOSIMÉTRIE

- **Dose Absorbée ou délivrée** : C'est la quantité d'énergie absorbée par unité de masse de matière irradiée. Elle s'exprime en Gray (Gy), correspondant à l'absorption d'un joule d'énergie par kilogramme de matière. Elle est directement liée aux paramètres d'exposition radiologique et est mesurée à la sortie du tube. En scanographie on calcule le **Produit Dose Longueur** (PDL ou DLP), correspondant au **produit du CTDIvol**, (Computed Tomographic Dose Index, correspondant à la dose délivrée par unité de volume irradié), **par la longueur explorée**, exprimé en mGy.cm. Le PDL rend ainsi compte de la dose totale délivrée au cours d'un examen.

- **Dose Efficace** : Elle permet de calculer le risque statistique théorique maximum d'apparition d'effets cancérogènes. Pour tenir compte de la susceptibilité variable des organes aux radiations, un facteur de pondération (facteur tissulaire) est appliqué pour définir pour chaque organe une dose efficace, exprimée en Sievert (Sv), telle que **Dose Efficace = Dose Absorbée (PDL) x Facteur Tissulaire** (facteur de pondération tissulaire par organe). En pratique scanographique, l'examen explorant plusieurs organes d'une même région du corps, un facteur a été proposé par région. Il est de 0,0021 pour la tête, utilisé en scanner dentaire pour calculer la dose efficace.

- **Optimisation** : Elle permet la limitation de la dose délivrée à la population générale et à chaque patient:

 - d'une part, par la **justification** de chaque examen, en se limitant à ses indications (dont l'implantologie);

 - d'autre part, en **limitant la dosimétrie** par l'utilisation, par un **radiologue entraîné**

 - .de scanner 64 barrettes, autorisant des temps de pose limités à 1 ou 2 secondes,

 - .de constantes minimales: baisse de la tension (80 à 120 kV), de l'intensité (40 à 100 mA),

 - .d'une hauteur limitée de volume d'os alvéolaire étudié au strict nécessaire.

LES AVANTAGES DU SCANNER PRE-IMPLANTAIRE

- **par rapport aux techniques radiologiques classiques** sont fondamentaux: ce sont l'étude mensurative du **volume osseux** dans les trois dimensions et une approche plus fiable de la **qualité de l'os** disponible ;
- **par rapport au cone beam**, le scanner peut être indiqué en cas d'**artéfacts cinétiques incoercibles ou prévisibles**, chez des patients âgés (**Parkinson**) ou **nerveux voire même chez des enfants**, l'optimisation permettant la distribution d'une dose minimale en un temps de pose ultra-court (une seconde pour certaines machines).

ARTEFACTS ET LIMITES DU SCANNER: ils consistent en artéfacts, pièges et limite en résolution.

■ **ARTEFACTS:** Ce sont les altérations de l'image qui rendent celle-ci peu ou non interprétable. Ce sont :

- **Les artéfacts métalliques:** On distinguera
 - **les artéfacts métalliques coronaires**, dus aux couronnes, **peu gênants**, puisque, en général, l'édentement est responsable d'une résorption, refoulant les crêtes alvéolaires édentées à distance des couronnes;
 - **les artéfacts métalliques radiculaires** où les tenons intracanaux restent des obstacles métalliques souvent gênants sur les reconstructions coronales. Certains algorithmes de filtrage (reconstructions itératives) sont aujourd'hui capables de les minimiser.
- **Les artéfacts de mouvement ou cinétiques:** Ces artéfacts de mouvements sont beaucoup plus rares qu'en cone beam, du fait de la plus grande rapidité de réalisation des coupes axiales (1 à 10 secondes d'immobilité requise).
- **LES PIÈGES DES IMAGES PANORAMIQUES** tomodynamométriques sont les mêmes qu'en cone beam.
- **LES AUTRES LIMITES DU SCANNER**
 - La limite **en résolution**, notamment sur les reconstructions et en cas d'os très déminéralisé, peut rendre difficile de distinguer un canal mandibulaire non « corticalisé » d'une lacune alvéolaire banale. C'est la confrontation des coupes axiales et des reconstructions qui permet de déterminer avec précision le siège du canal mandibulaire.
 - Une autre limite tient au fait que **les reconstructions perpendiculaires doivent être strictement orthogonales au plan d'acquisition axial**. Or l'axe implantaire est souvent plus ou moins divergent par rapport au plan occlusal tant dans le plan vestibulo-lingual que dans le plan mésio-distal. La solution idéale consiste en l'usage de **logiciel de simulation implantaire**. Une autre solution est fournie par les logiciels de reconstruction multiplanaires, permettant des reconstructions obliques dans l'axe d'un guide radiologique incliné dans le sens mésio-distal.

CONCLUSION SUR LE SCANNER. L'examen tomodynamométrique garde encore quelques indications en implantologie, notamment en cas d'**artéfacts cinétiques en cone beam**, incoercibles ou prévisibles chez des patients âgés (**Parkinson**) ou **nerveux voire même chez des enfants**, l'optimisation permettant la distribution d'une dose minimale en un temps de pose ultra-court (une seconde pour certaines machines).

RADIOANATOMIE IMPLANTAIRE Elle est évidemment la même quelle que soit la technique.

LE VOLUME OSSEUX DISPONIBLE dans un site choisi est défini par la mesure:

- **de l'épaisseur** de l'os au niveau de la crête sur toute la hauteur du processus alvéolaire
- **et de la hauteur** d'os disponible du sommet de la crête jusqu'au premier **obstacle anatomique** individualisable :
 - **au maxillaire:** les sinus maxillaires, les fosses nasales, le foramen incisif,
 - **à la mandibule:** le canal mandibulaire, le foramen mentonnier, et pour certains le canal incisif.

Les **obstacles anatomiques** limitent donc le volume osseux.

■ **AU MAXILLAIRE :**

- **LES SINUS** présentent des variantes anatomiques et des aspects pathologiques.
- **Normalement**, les sinus sont des cavités aériques parfaitement "noires", cernées par une paroi osseuse dense (blanche) et fine, et tapissées en dedans par une muqueuse très fine non visible habituellement, la membrane de Schneider ; le complexe ostio-infundibulaire, conduit de drainage principal vers la fosse nasale, situé au sommet de la paroi interne sinusienne dans la région infundibulaire, aboutissant au méat moyen, sous le cornet moyen, au niveau du plancher orbitaire, est perméable.
- **Les variantes du normal** sont les suivantes :
 - **Sinus hypoplasiques** de façon souvent unilatérale, la cavité de petite taille surmontant un volume osseux important, même en zone édentée;
 - **Sinus hyperplasiques** ou hyperpneumatisés, surmontant un volume osseux réduit, même en zone dentée;
 - **Sinus cloisonnés**, aux cloisons souvent frontales, rendant parfois difficile voire impossible une greffe sous-sinusienne et pouvant permettre dans certains cas une implantation ;

• **Les aspects pathologiques** sont les suivants :

Sinus procidents, notamment en cas d'édentement ancien, le sinus s'évaginant en bas et en avant, participant à l'atrophie de l'os alvéolaire sous-jacent;

Sinus inflammatoires: sinusite d'origine inflammatoire et/ou allergique dont les causes dentaires sont fréquentes, notamment en ce qui concerne les sinusites unilatérales. Les causes dentaires sont dominées par le kyste ou le granulome apico-dentaire sous-jacent, ayant rompu le plancher sinusien et envahi la muqueuse et la cavité sinusienne; il peut s'agir aussi de pâte dentaire intra-sinusienne qui peut être à l'origine d'une aspergillose sinusienne; les communications bucco-sinusiennes, souvent dues à une avulsion dentaire notamment des dents de sagesse, peuvent entraîner une sinusite pouvant perdurer, même si cette communication s'est ultérieurement refermée. Dans le cadre des sinusites, on distingue :

▪ **les sinusites aiguës**, suppurées, volontiers cliniquement parlantes (mouchage purulent, céphalées, fièvre, vertiges surtout en cas d'atteinte sphénoïdale) associant radiologiquement épaississement muqueux irrégulier, festonné, bulleux, niveau liquide et ostium infundibulaire souvent obstrué (sinusite de confinement) ;

▪ **les sinusites chroniques**, souvent asymptomatiques, associant épaississement muqueux régulier, en cadre e-t /ou polypoïde calcifications linéaires internes, épaississement pariétal à terme) souvent obstruction ostiale par l'épaississement muqueux et/ou d'autres causes (déviation du septum nasal, concha bullosa, cellules de Haller...)

■ **LES FOSSES NASALES** peuvent être aussi un obstacle en cas d'atrophie osseuse sous-jacente ; elles peuvent présenter une déviation de la cloison et ou un aspect bulleux des cornets moyens (concha bullosa) pouvant participer à l'obstruction d'une narine voire d'un méat moyen; elles peuvent être aussi le siège de pathologie inflammatoire (rhinite) ou tumorale (épithélioma naso-sinusien).

■ **LE FORAMEN INCISIF** peut aussi constituer un obstacle en cas de perte d'une incisive centrale. Ce canal tend alors à se développer d'avantage du côté de l'édentement, participant à l'atrophie du procès alvéolaire. Un **kyste** du canal palatin peut aussi être un obstacle à l'implantation.

■ **SI LES APOPHYSES PTERYGO-MAXILLAIRES** sont choisies comme site implantaire, les obstacles anatomiques que constituent **l'artère palatine descendante**, **l'artère maxillaire** et sa branche collatérale **alvéolaire postéro-supérieure** sont à repérer sur les images scanographiques et à éviter autant que possible en orientant l'implantation selon un axe oblique en haut, en arrière et en dehors, idéalement simulé sur ordinateur à l'aide d'un logiciel.

■ **VARIANTES MORPHOLOGIQUES DU PROCES ALVEOLAIRE**. Le volume d'os disponible dépend aussi de l'obliquité ainsi que des variations de la silhouette du procès alvéolaire, liées ou non aux phénomènes de résorption (concavité vestibulaire maxillaire antérieure), visibles sur les reconstructions perpendiculaires.

■ **A LA MANDIBULE**, les obstacles anatomiques sont les suivants :

■ **LE CANAL MANDIBULAIRE** qui présente aussi des variantes.

▪ **Typiquement** : le canal naît en arrière au niveau de l'épine de Spix, de la corticale linguale. Il se dirige en avant et en dehors pour donner le foramen mentonnier, vestibulaire.

▪ **Les variantes** du normal concernent :

- **le trajet du canal**, qui peut être :

. totalement **lingual** sur tout son trajet, offrant la possibilité d'implanter en dehors de lui, en vestibulaire;

. plus rarement, totalement **vestibulaire** ;

. **récurrent**, son trajet décrivant une courbe antérieure juste avant de donner le foramen mentonnier ; cette récurrence ou trajet rétrograde est fréquente, habituellement limitée à 2 ou 3 mm, mais pouvant atteindre l'apex de la canine, soit 1 cm environ en avant du trou mentonnier ;

- **son siège**: il peut être haut situé, voire **crestal** en cas d'atrophie ancienne ou sévère ;

- **l'aspect du canal** qui est rarement **dédoublé**, le plus souvent de façon partielle.

Le canal est parfois difficile à mettre en évidence, surtout en cas de déminéralisation ; c'est ici la confrontation des coupes et des reconstructions qui permet de le situer avec certitude.

■ **LE FORAMEN MENTONNIER**

▪ **Typiquement**, il s'ouvre à mi-hauteur du procès alvéolaire et est situé soit à l'apex de la deuxième prémolaire, soit entre les apex des deux prémolaires.

▪ **Ses variantes** concernent :

- **son siège** qui peut être soit situé très haut voire **crestal**, soit plus antérieur, en regard de la première prémolaire, soit plus postérieur, en avant de la première molaire.

- **son nombre** : trou mentonnier **double** (en fait souvent pseudo dédoublés), souvent décalés sur le plan mésio-distal, parfois sur un même plan vertical, rarement triples, exceptionnellement absent.

■ **LE CANAL INCISIF MANDIBULAIRE** s'étendant du canal mandibulaire jusqu'à l'apex de l'incisive centrale, contient une branche trophique du nerf mandibulaire et n'est pas considéré pour la plupart comme un véritable obstacle à éviter ; il est recommandé cependant de **ne pas implanter au contact** de ce canal, ce qui pourrait causer des paresthésies voire des phénomènes douloureux à la mise en charge.

■ **VARIANTES DU NORMAL** pouvant faire obstacle : **concavité d'origine linguale** rétrécissant le procès alvéolaire antérieur; **lacune de Stafné**, correspondant à une cavité mandibulaire linguale postérieure, occupée par des éléments glandulaires salivaires et des reliquats graisseux...

LA QUALITE DE L'OS DISPONIBLE est appréciée sur la densité de l'os spongieux et l'épaisseur des corticales.

- **La densité (épaisseur et nombre) des travées osseuses** : en cas de déminéralisation avancée, on observe une raréfaction, voire une disparition des travées osseuses (patients âgés et/ou édentés); on pourrait aussi mesurer la densité de l'os spongieux en **Unités Hounsfield en scanner**, mais la grande variabilité de sa densité dans un même héli-maxillaire voire dans une même région dentaire rend ce type de mesure laborieux peu pratiqué. **C'est l'appréciation des densités relatives péri-implantaires par logiciels de simulation qui est la plus pratiquée.**
- **L'épaisseur des corticales** est mesurée directement en millimètres. Dans certains cas, les corticales peuvent apparaître très épaisses, voire exubérantes : c'est le cas du «torus» palatin (au maxillaire) ou lingual (à la mandibule), variantes du normal permettant dans certains cas un appui cortical confortable, voire un prélèvement autogène généreux d'os cortical.
- L'imagerie 3D permet d'analyser les **modifications de la structure osseuse** (ostéocondensation, déminéralisation osseuse) et de mettre en évidence des structures intra-osseuses pouvant passer inaperçues sur les clichés conventionnels. Enfin tout **os pathologique** (dysplasie fibreuse, Paget, ostéites, ostéonécroses, tumeur maligne...) est une contre indication de l'implantation.

LES LOGICIELS DE SIMULATION IMPLANTAIRE sont une application éprouvée de l'imagerie 3D.

■ **PROTOCOLE DE TRANSFERT ET D'ECHANGE:** C'est à partir de **coupes axiales de type DICOM** que le logiciel de simulation permet la réalisation de **reconstructions de type dentascanner.**

Classiquement, les images sont transmises au praticien sous forme de données DICOM (Nobelguide*, DicomInsight*) ou dans le format du logiciel (Simplant*, 3Dmax*,) sur Compact Disc (CD) ou bien par messagerie électronique (e-mail ou FTP) dans le réseau Internet.

Après transfert des données sur son disque dur, le praticien peut étudier l'examen 3D sur son ordinateur et pratiquer une **simulation pré-implantaire**, produisant des images qu'il peut archiver sur son disque dur. Il est possible enfin de pratiquer une édition sur imprimante papier au format A4. Ces modes d'enregistrement (informatique et tirage papier A4) prennent facilement place dans le dossier du patient et sont aisément consultés par la suite.

Présentation d'un examen 3D sur écran: Sur l'écran s'affichent:

- **une coupe axiale:** repérée sur les autres images par une ligne horizontale;
- **une reconstruction panoramique:** repérée sur les images perpendiculaires par une ligne verticale, et sur les axiales par une courbe parallèle à la crête ;
- **des reconstructions perpendiculaires:** repérées sur les autres images par des lignes verticales ;
- **des reconstructions tridimensionnelles**, de transparence variable, qui viennent compléter l'exploration.

Chaque écran est ainsi composé de reconstructions perpendiculaires, repérées sur les autres plans. On peut naviguer à l'envi dans le maxillaire étudié en cliquant simplement sur une zone quelconque, qui sera automatiquement affichée dans les trois dimensions de l'espace.

■ **LA SIMULATION IMPLANTAIRE.** En cliquant sur une icône figurant un implant, on peut déplacer l'icône-implant et la positionner sur les reconstructions concernant le site implantaire choisi. L'implant est immédiatement visualisé dans les trois plans de l'espace. Sur les reconstructions perpendiculaires, il apparaît au maximum sur l'image centrale de la région dentaire et son volume se décline sur les reconstructions adjacentes.

Les apports majeurs de la simulation implantaire concernent le volume osseux et la qualité de l'os.

■ **LE VOLUME OSSEUX DISPONIBLE.**

• **Il dépend de l'épaisseur et de la hauteur d'os** jusqu'au premier obstacle anatomique.

La simulation autorise son **exploitation idéale** en permettant de faire varier pour chaque implant:

-ses dimensions : diamètre et longueur modifiables à l'envi ;

-son inclinaison dans les plans vestibulo-lingual et mésio-distal au besoin ; c'est la **seule méthode permettant de visualiser simultanément la double obliquité d'un implant.** Les inclinaisons obtenues sont aussi mesurables grâce à un outil spécifique.

En fonction d'un volume osseux disponible donné, plusieurs solutions sont souvent possibles, et celle correspondant au meilleur compromis entre tous les facteurs (osseux, implantaires et prothétiques) sera retenue.

- **Cependant, certaines règles d'exploitation** du volume osseux sont toujours à respecter, à savoir:
 - **espace de sécurité entre obstacle anatomique et implant**, typiquement de 2 mm mais dont l'importance est à apprécier par chaque chirurgien en fonction de son expérience et des exigences locales (recherche d'appui bicortical par exemple);
 - **espace entre piliers** (dents ou implants): classiquement 2 mm au minimum;
 - **inclinaison implantaire inférieure à 30 degrés** par rapport à l'axe prothétique.
 - **La mesure d'un volume** est aussi possible, grâce à un outil spécifique, qui permet de marquer en couleur d'une surface dans les trois plans de l'espace, l'ordinateur en déduisant la valeur volumique, affichée en millimètres cubes. Cet outil voit sa meilleure application dans la **prévision du volume d'un greffon**.
 - **L'utilisation d'un guide chirurgical** permet de reporter en bouche du patient les constatations issues du bilan scanographique. Plusieurs types de guide peuvent être retenus:
 - **billes en titane**: aidant au choix du point de forage (émergence);
 - **repères à type d'axe** : cônes de gutta-percha, tenons ou tubes-guide en titane, donnant en outre une indication sur l'orientation idéale de l'implant; guides avec axe central et repères vestibulo-linguaux...
 - **guide en forme de prothèse provisoire**: dents du commerce ou provisoire en résine, recouverte d'une couche de baryte (radio-opaque).
 - **L'application de la Stéréolithographie**, permettant la reproduction robotisée de volumes en résine, a permis la réalisation de guides chirurgicaux de haute précision. Après simulation implantaire, les données du bilan pré-opératoire sont adressées sur CD-Rom ou par Internet à une société spécialisée qui fournit au praticien un guide chirurgical idéal (type Surgiguide*) reproduisant parfaitement en bouche du patient les données de la simulation.
 - **LA QUALITE DE L'OS DISPONIBLE** peut être appréhendée de trois façons:
 - *Elle peut être appréciée de façon subjective*, comme sur les films radiologiques, mais cette appréciation ne peut être globale, pour un maxillaire donné, du fait de la grande variabilité de densité de l'os spongieux d'une région dentaire à l'autre.
 - *La qualité de l'os peut être aussi être mesurée en scanner (densitométrie)* par des outils spécifiques. Cependant, comme nous l'avons vu, l'os spongieux est de densité très variable, chez un même patient, et même au sein d'un même héli-maxillaire, où l'on peut rencontrer des densités élevées, notamment dans la région symphysaire, et des densités très basses, surtout dans les régions postérieures. Des variations importantes de densité peuvent se voir aussi d'une région dentaire à l'autre pour des raisons diverses.
 - *L'idéal est donc d'apprécier la qualité de l'os dans le site implantaire* et au mieux dans la zone d'ostéo-intégration; c'est ce qui est permis par la mesure de la «qualité» de l'os. Elle permet de calculer, pour un implant donné, la densité relative moyenne de l'os autour de l'implant, du collet à l'apex implantaires. Cette densité osseuse s'affiche en temps réel selon un graphique représentant :
 - en ordonnées: l'implant lui-même en fonction de sa longueur,
 - et en abscisses: la densité de l'os peri-implantaire exprimée en Unités Hounsfield.
 - *Une analogie est possible avec la classification de Branemark*:
 - en cas de densité moyenne inférieure à +400 UH, il s'agit d'os déminéralisé (classe IV de Branemark); dans ce cas, la recherche d'un appui bicortical est indispensable pour assurer une stabilité primaire à l'implant;
 - entre +400 et +800 UH, on est en présence d'os de type mixte-spongieux (classe III);
 - de +800 à +1200 UH, c'est un os de type mixte-cortical (classe II),
 - et au delà de +1200 UH, c'est un os cortical (classe I).

Cette fonction peut avoir un intérêt réel pour la stratégie opératoire. Une forte déminéralisation est illustrée par une faible densité péri-implantaire et fait craindre l'éventualité de micromouvements de l'implant, pouvant remettre en question l'ostéo-intégration et invitant à la recherche d'un appui bicortical. La courbe de qualité osseuse obtenue alors a un aspect particulier avec une forte densité aux deux extrémités de l'implant. Le contrôle post-opératoire vérifie l'application fidèle de la simulation.

■ BILAN ET SUIVI DES GREFFES PRE-IMPLANTAIRES :

Pour la chirurgie reconstructrice pré-implantaire, deux temps sont à distinguer:

- **AVANT LA GREFFE** : Outre la vérification de l'absence d'inflammation sinusienne (sinusite) et la perméabilité du complexe ostio-méatique des sinus maxillaires, l'imagerie 3D permet l'étude rigoureuse du **volume osseux nécessaire à un comblement sous-sinusal**, calculant automatiquement le volume à combler par le greffon après simulation implantaire. Un calcul volumique est aussi possible pour prévoir le **volume d'une apposition**. Elle

permet aussi de *mesurer le volume et la qualité d'os* dans les **régions symphysaire et angulaires (ramiques) de la mandibule**, ainsi qu'au niveau de la **voûte** crânienne en prévision d'un prélèvement pariétal.

- **APRES LA GREFFE : Le contrôle à 6 mois du greffon** permet de vérifier la présence des **critères de réussite**:
 - le **volume** d'os greffé qui doit être suffisant, compte tenu des inévitables phénomènes de remodelage (quel que soit le site donneur ou le type de greffe) voire de résorption (surtout pour l'os iliaque).
 - les **contours** du greffon qui doivent être nets et réguliers;
 - les **contacts** du greffon avec l'os receveur qui doivent être intimes, idéalement insensibles et les contacts avec le matériel d'ostéosynthèse (vis en titane ou fils d'acier) qui doivent être nets,
 - la **densité** du greffon qui doit être supérieure ou égale à celle de l'os résiduel;
 - l'**homogénéité** du greffon: une trop grande hypodensité, le plus souvent au sein d'un volumineux greffon, n'est pas toujours synonyme de nécrose centrale mais doit faire repousser voire abandonner le projet implantaire;
 - **en cas de comblement sous-sinuisien**, l'absence ou la *faible importance de la réaction inflammatoire de la muqueuse sinusienne* ainsi que la *perméabilité de l'ostium infundibulaire*.

Le contrôle de la greffe permet enfin la réalisation d'une **simulation implantaire**.

CONCLUSION SUR LES LOGICIELS DE SIMULATION IMPLANTAIRE. Ils permettent:

- l'**exploitation optimale du volume osseux**, grâce à la simulation, permettant de visualiser les implants en place dans les trois dimensions de l'espace ainsi qu'une chirurgie fidèle à la simulation grâce à l'usage de guides radiochirurgicaux (Surgiguides*...)
- et l'**étude de la qualité de l'os** dans la zone d'ostéo-intégration.

Outre leur **apport chirurgical**, leurs intérêts **pédagogique** pour la présentation du projet implantaire au patient ou à d'autres praticiens et **pratique** (rapidité, fiabilité, reproductibilité, gestion et rangement des documents, transmission électronique) en font des outils devenus pour beaucoup indispensables.

LA NAVIGATION ROBOTIQUE IMPLANTAIRE (Robodent*...) est une application plus récente du scanner et peut s'appliquer au cone beam.

■ **PRINCIPE** : Il consiste, après réalisation d'un scanner dentaire ou d'un cone beam et d'une simulation implantaire, de reproduire en bouche du patient cette simulation en étant guidé sur l'écran affichant les images pré-opératoires par un système d'émetteurs infra-rouges et de caméras satellites, tout comme un système GPS vous guide pour vous déplacer d'un point à un autre.

■ **DESCRIPTION DE LA PROCEDURE** :

- Un **cone beam ou un scanner** est réalisé sur un patient porteur d'un guide radio-chirurgical comportant des repères à type d'émetteurs infra-rouges. L'examen est transmis sous format DICOM sur l'ordinateur du système de navigation permettant la réalisation d'une **simulation pré-implantaire** qui sera utilisée lors de l'intervention.
- **Pendant la chirurgie**, la position de la tête du patient est repérée par le guide radio-chirurgical porteur des repères infra-rouges, de même que celle du contre-angle est contrôlée par des repères identiques, tous détectés par des caméras infra-rouges informant l'unité centrale du système en temps réel. Le praticien opère en contrôlant l'évolution de son forage sur les images 3D, reproduisant *in-vivo* les éléments de la simulation implantaire. Il s'assure de la fidélité de l'intervention en superposant l'image de la pièce de forage sur celles de la simulation, grâce à trois fenêtres permettant de contrôler respectivement les inclinaisons mésio-distale et vestibulo-linguale et la profondeur du forage. Enfin, un ensemble de repères et d'alertes visuels et sonores permet de prévenir tout risque de fausse-route.

CONCLUSION sur les Guides Chirurgicaux et la Navigation Robotique: La simulation pré-implantaire est le point commun entre ces deux applications de l'imagerie 3D, le transfert en bouche du patient s'effectuant soit par guide chirurgical, soit par navigation et contrôle direct du geste chirurgical sur écran de l'imagerie 3D pré-opératoire. Ces deux méthodes, pouvant paraître concurrentes nous semblent au contraire complémentaires dans le but d'une implantation la plus fidèle possible aux exigences de la prothèse.

CONCLUSION GENERALE La radiologie conventionnelle a donc montré ses limites, notamment dans l'étude volumique et surtout qualitative de l'os disponible. L'avènement des techniques d'imagerie numérique que représentent le **cone beam**, la tomодensitométrie, et leurs applications informatiques (la **simulation implantaire** et la **navigation robotique**) nous semble décisif pour les progrès inéluctables de la chirurgie implantaire.