

# La reconstruction faciale

Gérald Quatrehomme  
Gérard Subsol  
Serge Van Sint Jan

## Introduction

*Identité, identification: ces mots représentent à la fois une obligation morale de toute Société démocratique (identifier formellement tout sujet décédé), mais aussi une formidable évolution technique et scientifique depuis ces dernières décennies. Il existe de nombreuses circonstances qui font perdre son identité à un individu, aussi bien chez le vivant (perte, vol, ou destruction, volontaire ou non, de papiers d'identité, pathologie neuropsychiatrique, âge, fugue, immigration...) que chez un sujet décédé (6.1). Dans ce deuxième cas, la cause de cette perte d'identité peut être involontaire (décomposition, mutilation traumatique, submersion, carbonisation, squelettisation), ou volontaire et habituellement criminelle (dépeçage, mutilation, carbonisation...), essentiellement dans le but de dissimuler le corps ou ses fragments et retarder l'identification. On peut cependant dire que tout sujet décédé a perdu son identité provisoirement, sauf dans des circons-*

*tances bien établies (décès dans un service hospitalier par exemple, décès à domicile entouré de proches, etc.), avec cependant les nuances et la prudence indispensables.*

## Notions de base

L'intérêt à rendre cette identité est évident. Il existe manifestement un intérêt pénal (car en cas d'infraction pénale, l'identification de la victime est souvent un préalable indispensable à l'identification de l'auteur de l'infraction), civil (tous les actes civils comme la succession, les indemnités d'assurance, le remariage sont en quelque sorte suspendus tant que l'identification formelle n'est pas intervenue). Mais il faut aussi souligner l'intérêt moral: c'est un devoir moral pour toute société démocratique de prendre soin de l'identification formelle des sujets décédés. Il faut se poser cette question importante: nos sociétés européennes prennent-elles toute précaution pour aboutir à une identification formelle dans tous les cas, ou se contente d'une «silhouette d'identification», donc d'une «silhouette d'identité», par méconnaissance scientifique, manque de formation des acteurs concernés (police ou gendarmerie, magistrats, voire médecins légistes), ou d'un coupable laxisme, laissant la porte ouverte à des erreurs ou substitutions d'identité, volontaires ou non, avec toutes les conséquences pénales, civiles, et morales, dont nous avons parlé ci-dessus. L'importance d'une identification formelle (c'est-à-dire scientifiquement absolue) a d'ailleurs été rappelée dans la recommandation européenne n° R(99)3 du Comité des Ministres aux États membres, relative à l'harmonisation des règles en matière d'autopsie médico-légale, adoptée le 2 février 1999 (Quatrehomme et Rougé, 2003). L'enquête

Tableau 6.1. Quelques situations d'identification médico-légale chez le sujet décédé.

<b>Corps entier</b>
lésions traumatiques du visage
décomposition
carbonisation
submersion/immersion
<b>Fragments</b>
morcellement du corps (dépeçage, traumatisme, carbonisation...)
<b>Squelette</b>
entier
os isolé
os fragmenté

doit amener les données *ante mortem* de comparaison indispensables à l'identification, et les médecins légistes et les scientifiques utiliseront les méthodes scientifiques appropriées au cas particulier présenté, pour effectuer cette comparaison.

Ceci nous amène à rappeler les quatre qualités de l'identification : absolue (formelle, positive), probable, possible, ou exclue (Quatrehomme *et al.*, 1999, Quatrehomme et Subsol, 2005) (voir p. 435).

Le caractère absolu ou exclu d'une identification ne peut reposer que sur des méthodes scientifiques et comparatives, et il existe seulement quatre méthodes de ce type à notre disposition : les comparaisons par empreintes digitales, les comparaisons radiologiques, les comparaisons odontologiques, et les comparaisons ADN. Seules ces quatre méthodes aboutissent à des probabilités de 1 ou proches de 1, donc à une identification que nous pourrions considérer scientifiquement comme formelle. Occasionnellement une autre méthode peut aboutir à une identification formelle, du fait d'un élément remarquable, comme une prothèse de hanche avec son numéro, ou un tatouage inhabituel, qui permettra une comparaison absolue avec une photographie *ante mortem*. Toutes les autres méthodes ne donnent qu'une probabilité trop faible (ce que nous avons appelé identification probable ou possible). Ce caractère probable ou possible n'est pas attribué scientifiquement, mais par simple argument de fréquence : par exemple la découverte de papiers d'identité dans la poche d'un sujet décédé, représente en terme de fréquence une identité probable, mais n'a aucun caractère scientifique, et ne peut donc éliminer une substitution d'identité.

Mais ces méthodes comparatives nécessitent de posséder des éléments de comparaison, c'est-à-dire une ou plusieurs pistes de sujets disparus. Au début d'une enquête, il n'y a souvent aucune piste, et il faut alors utiliser des méthodes dites reconstructives, dont l'objectif est d'orienter les enquêteurs vers un disparu, de resserrer progressivement les possibilités. Ces méthodes sont souvent anciennes et élémentaires (comme la description simple du corps, des vêtements ou objets personnels, ou la description anthropométrique plus sophistiquée de Bertillon); ou plus délicates (comme l'anthropologie médico-légale pour l'estimation de la stature, du sexe, de l'âge, et du groupe biologique), voire même particulièrement sophistiquées : c'est le cas des techniques souvent regroupées sous le terme générique de « reconstruction faciale », ou « reconstitution faciale », dont nous allons parler

ci-dessous. Ces techniques sont délicates, et nécessitent une maîtrise technique importante.

La terminologie utilisée est parfois ambiguë (reconstitution, restitution, restauration, ou reconstruction faciale sont utilisées avec des significations variables selon les auteurs). La terminologie a été éclaircie et expliquée dans Quatrehomme (2000), Quatrehomme et Iscan (2000), Quatrehomme et Subsol (2005); pour la clarté de l'exposé, nous utiliserons les mêmes définitions, et envisagerons successivement : la restauration faciale, la reconstruction faciale, la superposition faciale, la comparaison d'images photographiques et vidéo, et le vieillissement artificiel d'une image photographique, notamment chez l'enfant. Bien que disparates en apparence, ces méthodes ont en commun la connaissance précise de l'anatomie du visage, les épaisseurs des parties molles en certains points anthropologiques, et les rapports des différents éléments « nobles » du visage entre eux, essentiellement en terme de proportion. Ces méthodes sont bi ou tridimensionnelles, informatisées ou non.

Pour conclure cette introduction, nous constatons qu'il existe :

- deux types d'identification (comparative, chaque fois qu'un élément *ante mortem* peut être comparé à un élément *post mortem*), et reconstructive (dans tous les autres cas);
- quatre qualités d'identification (certaine, ou absolue, ou formelle, ou positive; probable; possible; exclue; Tableau 2.4, p. 435);
- et une stratégie d'identification, variable selon le cas particulier présenté, mais qui met en œuvre trois niveaux, simple (comme la description du corps, des vêtements, des objets personnels, et les empreintes digitales), moyen (comme la radiologie, l'autopsie, l'anthropologie de base...), et très complexe (comme la biologie moléculaire, la microscopie électronique à balayage, la reconstruction faciale).

Les moyens simples ne doivent jamais être oubliés, en particulier les empreintes digitales, dont la simplicité et la performance ont été constatées à plusieurs reprises lors de catastrophes de masse. La stratégie utilisée concerne les médecins légistes et les scientifiques, car elle doit être adaptée au cas particulier présenté. C'est la seule façon d'obtenir les résultats les plus rapides pour un coût le plus faible possible. Il est tout à fait anormal que des techniques ADN soient utilisées en première intention, alors qu'une simple comparaison odontologique ou radiologique aboutirait dans le cas présenté à une identification formelle, très rapidement, et pour un coût très faible.

## 1. Mécanismes de reconnaissance des visages

La reconnaissance des visages est un phénomène complexe, et extraordinaire dans sa rapidité. Cette capacité semble très précoce dans le développement d'un individu. Notre encéphale a des capacités de discrimination étonnante, différenciant entre eux des milliers de visages différents que nous connaissons ou pas. Pourtant les visages se modifient, ne serait-ce que par la mimique (modifications subtiles et transitoires), ou par les modifications physiologiques ou pathologiques, involontaires (âge, maladie), ou volontaires (couleur et style de coiffure). Ceci a des implications médico-légales évidentes, puisque la mimique joue un très grand rôle dans le processus de reconnaissance d'un visage. Les témoins peuvent retenir une face tendue, traduisant l'anxiété lors d'un délit ou d'un crime, et ne pas reconnaître le sujet présentant un autre état psychologique, surtout s'il tente de modifier son habitus. De plus une caricature est reconnue sans effort, bien que très différente du visage du sujet. Inversement des visages d'un groupe biologique différent du nôtre peuvent nous paraître très difficiles à différencier.

La capacité de reconnaissance du visage est considérée comme une fonction de l'hémisphère droit. Certaines lésions encéphaliques peuvent entraîner un trouble sélectif de la reconnaissance des visages, appelé « prosopagnosie », le sujet devenant incapable de reconnaître des visages familiers ou célèbres. Cette incapacité étrange est parfois totalement isolée. En l'absence de prosopagnosie, les perturbations dans la perception ou la reconnaissance des visages apparaissent plus importantes pour des sujets atteints d'une lésion de l'hémisphère droit que de l'hémisphère gauche. Les visages semblent mieux reconnus dans la moitié gauche du champ visuel, donc par l'hémisphère droit. Tous ces éléments sont en faveur de la conception classique du fonctionnement de l'encéphale, c'est-à-dire la conception localisationnelle, portée par l'étude lésionnelle expérimentale ou clinique. Mais cette conception localisationnelle hémisphérique est manifestement insuffisante pour expliquer l'ensemble de ces processus neuropsychologiques complexes, ne serait-ce que parce que l'hémisphère gauche a certainement de véritables compétences visuo-spatiales, mais aussi qu'il existe des fluctuations importantes dans la réponse à un stimulus, en fonction de la profondeur des opérations cognitives réalisées.

Même si, encore aujourd'hui, la séquence des opérations effectuées par un système cognitif, conduisant à une réponse comportementale de reconnaissance, n'est

pas connue avec toute la précision souhaitable, des tentatives de modélisation ont émergé, notamment depuis 1980, du fait d'un développement croissant du courant cognitiviste par rapport au behaviorisme. Le processus de reconnaissance du visage est considéré comme particulièrement complexe, faisant référence à des fonctions supérieures multiples et intriquées comme la mémoire, la dénomination des objets, et d'une façon générale tous les processus neuropsychologiques supérieurs que l'on observe particulièrement bien en clinique quand ils sont déficients (troubles mnésiques, agnosies, apraxies, aphasies, dyscalculies, troubles de la latéralité, troubles de dénomination d'une partie du corps...). La perturbation d'un ou plusieurs de ces éléments a souvent un retentissement, parfois important, sur la capacité de reconnaissance d'un visage.

### 1.1. Caractéristiques et variations de la reconnaissance des visages (Bruyer 1990)

Le plus étonnant de cette capacité est sa performance en terme de discrimination, et sa rapidité. La reconnaissance des visages est globalement meilleure chez les sujets de sexe féminin (Shepherd, 1981). La reconnaissance du visage d'un sujet de groupe biologique différent est difficile (Bruyer et Dussard, 1985). La reconnaissance d'un visage est meilleure si celui-ci s'écarte de la norme. Le substrat affecte manifestement la possibilité de rétention d'un visage (sujet réel, photographies, dessins stylisés, caricatures) (Ellis, 1975). Le « niveau d'encodage » de l'information joue un rôle important, puisque l'on constate que la reconnaissance d'un visage sera facilitée quand elle s'accompagne de réflexions personnelles concernant les traits du sujet, les traits de personnalité, la profession, donc d'un travail d'analyse volontaire de l'observateur. Tous les traits du visage n'ont pas la même importance pour la reconnaissance, et la difficulté semble augmenter quand on présente une photographie de profil ou de trois-quarts, par rapport à une photographie de face. L'entraînement améliore nettement les performances. La contextualisation du stimulus joue un rôle certain car ce contexte peut interagir ou non avec le stimulus, être traité de façon automatique ou délibérée. Parfois on identifie une personne par le contexte plus que par le visage lui-même (et il n'est pas rare de faire des erreurs dans ces conditions). Inversement on peut avoir des difficultés de reconnaissance rapide d'un visage, pourtant parfaitement connu, simplement parce que la personne est sortie de son contexte habituel.



Des phénomènes curieux se produisent, par exemple quand on présente une photographie « à l'envers » : ceci n'affecte pas la structure objective du stimulus, mais perturbe considérablement la reconnaissance des visages, beaucoup plus que celle d'autres objets (Rakover, 2005). Cette perturbation est atténuée avec des visages familiers et chez les enfants. De la même façon on peut étudier la capacité de reconnaissance avec des photographies en négatif, qui apportent la totalité des informations, mais ne permettent pas en général la reconnaissance. D'une façon générale, l'apprentissage améliore les performances.

## 1.2. Modélisation (Bruyer 1990)

Les modèles proposés ont été construits progressivement par l'expérimentation, en donnant un stimulus, et en observant la réponse comportementale consécutive à ce stimulus. Ceci s'effectue en faisant varier quantitativement les stimuli (par exemple reconnaître un visage célèbre parmi 50 photographies, avec un temps d'observation des photographies très limité), mais aussi qualitativement (dessins stylisés, caricatures, visages inversés, négatifs photographiques, multiplication de visages ayant une ressemblance certaine). On distingue les modèles analytiques (ou sériels, ou componentiels) de la reconnaissance des visages, qui traitent pas-à-pas l'information, et les modèles globalistes (ou holistiques, ou configuratifs), qui permettent un traitement global de l'information. Tous les auteurs s'accordent aujourd'hui pour penser que la perception des visages repose à la fois sur des processus componentiels et configuratifs. La stratégie dépend du problème posé (par exemple la reconnaissance d'un visage familier ou célèbre, par rapport à un visage inconnu), de la profondeur du traitement de l'information, et d'autres facteurs comme la contextualisation ou l'âge. On note une évolution des performances entre l'enfant et l'adulte : l'enfant traite la reconnaissance des visages de façon analytique, essentiellement à partir de 5-6 ans, puis améliore progressivement ses performances jusque vers 10-12 ans. Mais à partir de cette période, les performances baissent à nouveau, ce qui semble lié à un changement de stratégie, c'est-à-dire l'acquisition progressive d'une stratégie globaliste. De plus il existe certainement des profondeurs variables du traitement de l'information, avec des stratégies différentes selon cette profondeur.

## 2. La superposition faciale

La superposition faciale consiste à comparer le squelette crânio-facial avec le portrait (historiquement) ou la photographie (actuellement) de la personne disparue. Il est en effet habituellement aisé d'obtenir une photographie du disparu auprès de la famille ou des proches, mais la superposition faciale reste une technique très élaborée, scientifiquement complexe, utilisée en routine seulement par quelques équipes internationales. Trois méthodes sont utilisables : superposition photographique, vidéosuperposition, et superposition informatique. Historiquement, il semble que ce soit Weckler (1883), qui ait le premier effectué une tentative de comparaison entre un crâne et le portrait d'un personnage historique. Puis citons les tentatives de superposition d'un crâne avec un portrait par His (1865, JS Bach), Pearson (1926, George Buchanan).

La superposition photographique médico-légale (superposition d'un crâne avec une photographie) a été effectuée pour la première fois par Glaister et Brash (1937). Il y avait deux femmes décédées (M<sup>me</sup> Ruxton et sa femme de chambre) non identifiables, dans un même appartement. Les deux crânes furent superposés à la photographie de M<sup>me</sup> Ruxton, et un des deux crânes montra un excellent ajustement, contrairement à l'autre. Les auteurs en conclurent que ce crâne appartenait à M<sup>me</sup> Ruxton. Ils expérimentèrent la même méthode sur un cadavre, et constatèrent l'excellent ajustement ; inversement le crâne du cadavre ne s'ajustait pas correctement à la photographie de M<sup>me</sup> Ruxton. Ultérieurement plusieurs auteurs ont tenté d'améliorer cette méthode empirique (Grüner et Reinhard, 1959 ; Webster, 1955 ; Basauri, 1967). Le succès moderne le plus significatif est sans doute le travail de Helmer (1987), qui identifia ainsi les restes de Josef Mengele.

En pratique les photographies du crâne et celles du disparu sont agrandies (1/1), puis superposées. Le crâne, placé sur un trépied, doit être ajusté exactement en ce qui concerne sa position par rapport à celle de la photographie. La comparaison se fait par transparence, en superposant par exemple les deux négatifs, en traçant les contours de la face, et en marquant les points anthropologiques essentiels. S'il existe suffisamment de points convergents, le crâne peut appartenir au disparu. Les probabilités se multiplient en chaque point anthropologique, ce qui finit par donner une très forte probabilité que le crâne appartienne bien au disparu.

Tous les auteurs ont souligné la difficulté de cette méthode. En effet cinq problèmes majeurs sont posés (a) la distance (et donc l'agrandissement) ; (b) et



l'orientation du crâne, qui doivent être identiques ou très proches de la distance et l'orientation du visage sur la photographie; (c) la distorsion des images; (d) la profondeur de champ; et (e) les critères de décision, c'est-à-dire le choix des critères de comparaison, et le nombre minimum de critères de similitude ou convergence permettant d'affirmer l'identité du sujet. Le non respect de ces paramètres est source d'erreurs considérables et ruine tout espoir de réussir scientifiquement une superposition.

Les distances entre l'objectif photographique et, d'une part, le visage photographié, d'autre part le crâne, doivent être les plus proches possibles. La distance entre l'objectif de l'appareil photographique et le visage du sujet au moment de la photographie n'est évidemment pas connue. Or cette distance détermine le coefficient d'agrandissement qu'il faut appliquer à la photographie fournie par la famille du disparu pour obtenir un visage en grandeur réelle, c'est-à-dire de la taille réelle du visage du temps de son vivant (1 : 1). La distance ne peut donc être évaluée qu'indirectement en se servant par exemple des dimensions des objets visibles sur la photographie, aussi bien que des distances anthropologiques comme la distance interpupillaire ou la largeur bizygomatique sur une photographie de face, ou la distance glabella-gnathion sur une photographie de profil ou de trois-quarts. Dans tous les cas, il faut tenir compte de l'épaisseur des parties molles au zygion ou au gnathion, par exemple. Les objets volontiers utilisés sont les vêtements, le siège sur lequel est assis le sujet, voire même les autres sujets d'une photographie de groupe, leurs vêtements et objets personnels, qui devront être apportés au laboratoire. Un exemple simple de ce procédé est de mesurer la distance entre deux boutons sur le vêtement porté par le sujet lors de la photographie, puis mesurer la distance sur le vêtement réel apporté par l'entourage, pour connaître le facteur d'agrandissement nécessaire. La photographie du crâne doit être agrandie en dimension réelle également, ce qui est plus aisé puisqu'on dispose du crâne.

Cependant il est impératif de sélectionner sur la photographie du disparu des distances qui soient réelles et non en projection, ce qui introduirait une erreur éventuellement importante. D'autre part, les lignes courbes en trois dimensions se modifient lorsqu'elles sont projetées en deux dimensions (sur les photographies). C'est la raison pour laquelle certains proposent une approche mathématique qui permet d'éliminer le problème de l'agrandissement (Chandra Sekharan, 1971). Il suffit d'agrandir approximativement la photographie du visage jusqu'à 1/1 (en donnant une distance interpupillaire moyenne), et

d'agrandir parfaitement la photographie du crâne en 1:1. On prend alors diverses distances anthropologiques que l'on mesure sur l'agrandissement du visage, et on travaille ensuite sur des ratios (rapports de deux distances anthropologiques), le ratio faisant automatiquement disparaître le coefficient d'agrandissement par rapport à la dimension réelle. Par exemple si l'agrandissement du visage est «a» (valeur inconnue), les distances nasion-pogonion et gonion droit-gonion gauche valent respectivement  $ax_1$  et  $ax_2$ . Le rapport de ces deux distances est toujours  $x_1/x_2$ , quelle que soit la valeur de l'agrandissement «a». On modifie ainsi la taille de la photographie du visage jusqu'à obtenir les mêmes ratios, sur le visage et sur le crâne. Cependant il faut repérer correctement les points anthropologiques osseux à partir de la photographie du visage, et appliquer une correction sur les distances anthropologiques, compte tenu de l'épaisseur des parties molles sur le visage par rapport au crâne, notamment pour certaines distances horizontales, et plus précisément latérales, comme la distance bizygomatique (Chandra Sekharan, 1971).

L'orientation du crâne est une difficulté très importante également, car le visage sur la photographie est presque toujours dans une position intermédiaire (trois-quarts), jamais de face ou profil strict. Autrement dit le rachis cervical présente des positions de flexion, rotation, extension, inclinaison variées. D'où divers procédés plus ou moins ingénieux, la position retenue étant habituellement un compromis après divers essais et erreurs pour tenter d'ajuster l'orientation du crâne comme celle de la photographie. Certaines méthodes plus rigoureuses ont été proposées (Chandra Sekharan, 1993), permettant de déterminer mathématiquement le degré de flexion ou extension du rachis, d'inclinaison latérale ou de rotation.

La distorsion des images est un problème très habituel en photographie. Il est aisé de se rendre compte de l'importance de ce problème en photographiant un sujet en position standard, à la même distance et avec la même orientation, mais avec une focale différente (par exemple 50 mm versus grand-angle). Il est évident que les caractéristiques intrinsèques de l'objectif modifient et déforment l'image, parfois de façon considérable. Il faut donc idéalement photographier le crâne avec le même objectif que celui utilisé avec la photographie du disparu. Auparavant la plupart des photographies amateur étaient prises avec un objectif standard (50 mm), mais aujourd'hui les objectifs zoom (70-200 mm par exemple) compliquent la situation.

La profondeur de champ est maximale quand le diaphragme est le plus fermé possible, et inversement. La notion de profondeur de champ explique que des

parties situées à l'arrière-plan soient floues, et donc peu exploitables.

Si on suppose que tous ces éléments techniques aient été contrôlés et respectés, le dernier problème est donc l'opinion que l'on est amené à donner sur le résultat: identification exclue (sans doute décision la plus aisée dans cette technique), probable ou possible. Peut-on aller jusqu'à une identification absolue (formelle)? Cette importante question sous-entend que l'on établisse des *critères décisionnels* qui permettront de comparer le crâne et le visage, de noter des similitudes ou convergences «acceptables», et d'établir le nombre minimum de critères qui permettront d'affirmer l'identité du sujet. Il existe donc à la fois un problème qualitatif (qu'est ce qu'un critère de convergence?), et quantitatif (combien de critères minimum doit-on retenir pour affirmer que le crâne et le visage appartiennent à la même personne, et avec quelle probabilité?).

Sur le plan qualitatif, la similitude peut être considérée comme acceptable quand l'épaisseur des parties molles au niveau d'un point anthropologique se situe dans l'intervalle de confiance d'épaisseur des parties molles au niveau du point considéré (Yoshino, 1981). Il existe des publications dans la littérature donnant les mesures moyennes, et l'intervalle de confiance, en regard d'un point anthropologique, ou entre deux points anthropologiques.

Sur le plan quantitatif, Yoshino *et al.* (1995) étudient la fiabilité de la méthode à partir de 54 observations médico-légales (36 hommes et 16 femmes). Ces auteurs retiennent 18 critères de convergence intéressants, dont 4 critères concernant les contours de la face, 7 critères concernant l'épaisseur des parties molles au niveau de différents points anthropologiques, et 7 critères concernant les relations anatomiques entre plusieurs structures du visage ou du crâne (par exemple la distance entre le bord orbitaire latéral et l'ectocanthion, ou entre le bord latéral de l'ouverture nasale et le point alaire). Ces auteurs suggèrent la possibilité d'une identification absolue quand 13 critères de convergence au moins (parmi les 18 retenus) sont présents, alors que l'identification est probable ou possible quand 12 critères seulement ou moins sont présents. Ils retrouvent parmi leurs observations des exclusions d'identité. Ces auteurs donnent également les conclusions suivantes (a) le profil, du front (trichion) jusqu'au gnathion, en vue latérale ou oblique, est une partie très performante pour l'identification par superposition faciale; (b) il est recommandé d'utiliser à la fois des photographies du disparu de face et de profil (ou oblique) chaque fois que possible; en effet, chaque fois qu'il n'y avait qu'une photo-

graphie de face (pas de profil ni d'oblique), moins de 12 critères de convergence étaient acceptables, et l'identification était considérée comme probable ou possible, mais non certaine; (c) les crânes sans mandibule, contrairement à l'opinion classique (Koelmeyer, 1982), peuvent être positivement identifiés, quand 13 ou plus critères de convergence peuvent être retrouvés (Yoshino *et al.*, 1995).

La validation scientifique de la superposition faciale est assez rarement envisagée. Globalement la littérature est assez septique sur la possibilité de réaliser des identifications positives (formelles) par cette méthode, et retiennent en général la compatibilité, la forte probabilité, ou l'exclusion d'identité, plutôt que l'identification formelle. Yoshino (1981) a utilisé un crâne avec 21 photographies de visages de sujets différents, dont celle unique apparée avec le crâne en question. En vue frontale, plusieurs photographies étaient consistantes avec le crâne; par contre, de profil, une seule photographie montrait un contour du front et des épaisseurs de parties molles acceptables. Les auteurs concluent donc à la nécessité d'utiliser une photographie frontale et de profil (ou de trois-quarts) pour permettre des identifications certaines. Dorion (1983) pense que l'identification absolue n'est pas possible, démontrant qu'un autre crâne de même taille et de même contour peut s'ajuster à la photographie du disparu (Reddy, 1973; İşcan, 1988a). Austin-Smith et Maples (1994) utilisent 3 crânes et 100 photographies. Ils retrouvent 9% de fausses identifications, à partir d'une seule photographie, mais 0,6% seulement quand on utilise à la fois une vue frontale et une vue oblique ou de profil: ils concluent qu'il faut utiliser au moins deux (et si possible plus de deux) photographies du disparu sous différents angles.

La tendance actuelle est d'utiliser les **superpositions vidéo** (Helmer et Grüner, 1977; İşcan, 1988a, b; Seta et Yoshino, 1993; Yoshino, 2000; Koelmeyer, 1982; Dorion, 1983; Krogman et İşcan, 1986; Iten, 1987). Pour Yoshino *et al.* (1995), la méthode vidéo permet une comparaison techniquement plus aisée, car elle facilite l'orientation du crâne, ainsi que le mixage, le balayage horizontal et vertical, et le fading des images. La comparaison est plus rapide et l'analyse serait plus profonde. Cependant cet auteur reste fidèle à la comparaison photographique classique, qui donne des images plus fines et plus acceptables devant une Cour d'Assises. Il utilise donc les deux méthodes combinées (Yoshino et Seta, 1989; Seta et Yoshino, 1993). Quant à l'**informatique**, elle est également de plus en plus utilisée, soit en digitalisant les images, soit pour l'évaluation du résultat. La simple digitalisation des images permet grâce à certains logiciels une superposition

aisée, car il est facile d'agrandir, réduire et orienter les images. Le deuxième objectif est plus ambitieux, car il s'agit de laisser au logiciel le soin d'évaluer, comparer, et prendre une décision (Pesce Delfino *et al.*, 1993; Majumdar et Sinha, 1989; Nickerson *et al.*, 1991; Evenhouse *et al.*, 1992). Il s'agit d'une quantification objective des caractéristiques qui différencient les visages les uns des autres. Ce champ de recherche en pleine évolution actuellement.

On pourrait penser que les techniques de superposition faciale crâne-photographie vont progressivement devenir obsolètes du fait de la généralisation de l'ADN. Il n'en est rien, car il existe de nombreux cas où l'ADN de comparaison n'est pas utilisable (absence de famille connue, ADN inexploitable), de même que les techniques de comparaison radiologiques ou dentaires (du fait de l'absence de données *ante mortem* de comparaison, en tout cas exploitables).

### 3. La restauration faciale

Les médecins légistes pratiquent depuis très longtemps la restauration des doigts, quand le corps est décomposé. Ces techniques simples et bien connues permettent la prise des empreintes digitales pendant l'autopsie, avec parfois une réponse formelle sur l'identité du sujet avant la fin même de l'autopsie.

Par contre l'utilisation de la restauration faciale dans un but d'identification médico-légale fait l'objet de publications très rares dans la littérature. Ces méthodes s'adressent à un crâne ayant conservé une quantité suffisante de parties molles, même si la qualité des tissus est médiocre. Dérobert (1974) montre l'exemple de sujets présentant d'importantes modifications traumatiques du visage, dont la restauration a permis une amélioration spectaculaire. Des photographies du visage restauré purent ensuite être publiées, ce qui fut une aide majeure à l'identification. Spitz et Fisher (1980) présentent la photographie d'un visage décomposé, puis celle du visage restauré qui fut ensuite dessiné et diffusé dans les médias. Ubelaker (1991) montre également des dessins réalisés à partir de visages décomposés, pour permettre une publication dans les médias. Pötsch *et al.* (1994) travaillent sur des visages mutilés par des traumatismes, et diffusent le visage restauré dans les médias, sous forme de dessins ou de photographies, selon les cas.

Il existe en fait trois étapes dans ces procédés: la restauration, la restitution, et l'appropriation.

La **restauration** fait appel à deux types de techniques: chirurgicales et/ou thanatopraxiques. Les techniques chirurgicales sont utilisées essentiellement

quand le visage présente une mutilation traumatique. Il s'agit de techniques de chirurgie maxillo-faciale et plastique, faisant appel aux lambeaux de rotation, aux comblements de pertes de substance, aux sutures de grande qualité comme le surjet intradermique. Ceci peut permettre une restauration correcte, y compris dans des délabrements faciaux majeurs. Les techniques thanatopraxiques sont issues de celles utilisées par les thanatopracteurs lors des soins de conservation des corps, avant présentation à la famille du défunt. Elles s'adressent essentiellement aux visages décomposés. Ces méthodes consistent à injecter des produits qui vont soutenir les tissus, combler les parties du visage émaciées par la déshydratation, redonner de la tonicité aux tissus et notamment aux globes oculaires. Ces procédés ne doivent être utilisés qu'après que l'autopsie et les prélèvements médico-légaux nécessaires (humeur vitrée par exemple) aient été pratiqués.

La **restitution** du résultat peut être effectuée par quatre procédés.

- 1) Le plus simple est la **photographie** du résultat. Ses avantages sont la rapidité, la simplicité, et le faible coût. Ses inconvénients sont surtout représentés par la limite déontologique ou éthique, le résultat pouvant, malgré un travail de restauration de qualité, ne pas être humainement visible par les proches ou par les médias.
- 2) Le deuxième procédé est le **dessin**. Ses avantages sont d'être toujours visibles par les proches, donc publiables dans les médias. Ses inconvénients sont la nécessité de faire appel à un artiste («forensic artists»), et donc l'éventuelle subjectivité du résultat, puisqu'on demande à l'artiste d'humaniser le résultat de la restauration pour qu'il puisse être visible par les proches. Ce dernier point peut être aussi un avantage, dans la mesure où un résultat humanisé peut éventuellement déclencher plus aisément une démarche de reconnaissance.
- 3) Le troisième procédé est le **moulage** (Quatrehomme *et al.*, 1995, 1996, Quatrehomme, 2005). Le résultat de la restauration est moulé selon les procédés classiques en archéologie. La difficulté majeure est représentée par la fragilité des tissus qui vont supporter le moulage, ce qui justifie une grande qualité de la restauration. Le risque est en effet l'effondrement de tissus insuffisamment préparés sous le poids du moulage, et donc la déformation complète du moulage. En pratique, la partie avant et arrière du visage sont moulées séparément, délimitées par une barrière fine de bande plâtrée. Un élastomère est appliqué sur la partie avant du visage, rendu suffisamment consistant en ajoutant de la poudre de silice. Grâce à un catalyseur, l'élasto-



mère durcit en quelques minutes à quelques heures, tout en gardant une grande souplesse, ce qui permet de mouler le moindre détail du visage. Ensuite on fabrique une coque de plâtre de Paris, renforcée par des bandes plâtrées: cette opération se fait en plusieurs temps et en plusieurs jours, afin d'éviter la déformation de l'élastomère par le poids du plâtre. Avec de l'expérience, le démoulage ne pose pas de problème, permettant d'obtenir un négatif du visage. Ensuite on fabrique le positif en coulant du plâtre de Paris dans la coque négative (c'est-à-dire l'élastomère renforcé par la coque de plâtre). La même opération est appliquée à la partie arrière du visage et au crâne. Il reste ensuite à assembler ces deux parties en fabriquant un joint entre la partie avant et la partie arrière, dont la largeur est minutieusement calculée en fonction des mensurations anthropologiques prises au début des opérations sur le cadavre, et notamment la distance glabellé-opisthocrânion, nasion-opisthocrânion, et gnathion-opisthocrânion. Le tirage du positif peut aussi être effectué avec de la résine, beaucoup moins lourde mais plus coûteuse, et qui nécessite également de l'expérience technique. Les avantages du moulage sont multiples: résultats objectifs et tridimensionnels du visage restauré, technique fine et précise qui permet de restituer des détails anatomiques fins comme des rides. Mais le principal avantage est la possibilité de diffusion constante du résultat aux proches et aux médias, y compris quand le résultat de la restauration n'aurait pu être montré, ce qui est fréquent. Ses inconvénients sont sa complexité, qui nécessite un savoir-faire authentique, son coût matériel et en temps.

- 4) Enfin le **dessin informatique ou la retouche informatique** réalisé à partir du visage restauré ou non, ou de la photographie numérique, peut être dans l'avenir une possibilité intéressante, mais nécessite un savoir faire technique adéquat.

L'**appropriation** du résultat est l'étape qui va donner une piste, un guide vers des propositions d'identité. Si la famille ou les proches trouvent une certaine ressemblance avec le disparu, il est indispensable ensuite d'utiliser des méthodes d'identification comparative pour établir l'identité de façon absolue.

Les indications de la restauration nous semblent très larges. Nous l'utilisons dans les cas de mutilation du visage, de décomposition, de submersion, de carbonisation, en fait chaque fois que persistent sur le visage des parties molles en quantité suffisante, même si la qualité de ces tissus est médiocre, voire catastrophique. Nous proposons la restitution du résultat essen-

tiellement par moulage, sauf quand une photographie du résultat est humainement visible par les proches. Globalement, dans notre expérience, les résultats sont en général de bonne qualité, et permettent d'obtenir très rapidement une piste ou un témoignage. Ce côté rapide de l'appropriation avait été souligné par Pötsch *et al.* (1994). Ceci s'explique par le fait que, dans les indications que nous avons soulignées, la forme générale du visage persiste malgré la détérioration des tissus, et les rapports entre diverses parties du visage sont conservés, ce qui permet à la famille une reconnaissance possible et a priori assez rapide. Il nous paraît donc très important d'utiliser cette méthode en première intention quand persistent des parties molles, plutôt que de sacrifier ces parties molles pour faire une reconstruction faciale (d'ailleurs toujours possible dans un second temps si la restauration a échoué).

Enfin la comparaison des diverses méthodes de restitution suggère que le dessin donne d'excellents résultats, à condition que celui-ci soit réalisé à partir d'un volume 3D (c'est-à-dire directement en salle d'autopsie, ou à partir du moulage 3D du résultat), et non d'une photographie 2D du résultat, qui fait perdre beaucoup d'informations (Quatrehomme, 2005).

#### 4. La reconstruction faciale

Alors que les techniques de restauration s'adressent à un visage présentant une altération éventuellement importante des parties molles, mais qui persistent en quantité malgré tout suffisante, la reconstruction faciale s'adresse à un crâne lisse, totalement squelettisé, ou quand les parties molles sont en quantité insuffisante, ou inexploitable; ou encore quand la restauration n'a pas été concluante, du fait de l'insuffisance des parties molles. Cette méthode est utilisée comme une méthode de la dernière chance, quand toutes les autres techniques d'identification reconstructive ont échoué.

La reconstruction faciale est justifiée par le fait que le crâne peut, dans une certaine mesure, être considéré comme une matrice de la tête vivante, supportant les parties molles; le crâne osseux est un cadre dur qui supporte le visage mou. La reconstruction faciale, partant du crâne lisse, va donc tenter une approximation de la forme du visage à partir du crâne (Rathbun, 1984), par des méthodes variées, bi ou tridimensionnelles, informatisées ou non. Bien sûr la relation entre chaque point du squelette crânio-facial et les parties molles sus-jacentes ne pourra jamais être connue avec précision chez un sujet donné. Cependant, si on admet le principe que le crâne est le support des parties molles, on peut tenter de reconstruire la forme

approximative du visage pour espérer une ressemblance suffisante. On sait que le crâne ne peut pas donner tous les indices qui permettent une reconstruction correcte; de plus il y a tellement de détails, de subtiles nuances dans le visage, qu'il est certainement très difficile de réussir une reconstruction faciale suffisamment précise (Zavala et Paley, 1972). Mais le but, du moins en anthropologie médico-légale, n'est pas une ressemblance parfaite, mais suffisante pour être une aide, un stimulus, un guide vers l'identification, permettant de stimuler les fonctions cognitives des proches, s'il existe un certain degré de ressemblance. À la limite une caricature serait suffisante, si elle est reconnaissable par les proches.

Il faut donc être bien conscient qu'il ne s'agit que d'une approximation faciale (Rathbun, 1984), puisque l'on utilise une moyenne statistique d'épaisseur des parties molles, qui ne permettra de retrouver que les caractères généraux du visage. De plus certains éléments sont imprédictibles à partir de la matrice osseuse, comme certains caractères physiologiques (corpulence), chromatiques (couleur des yeux et cheveux), ou sociaux (style de coiffure, port de lunettes), bien qu'en médecine légale, ces éléments puissent être en partie connus par l'autopsie, quand il s'agit de restes et non d'ossements. Malheureusement ce sont souvent ces éléments aléatoires qui sont perçus comme caractères très identifiants par les proches pour tenter de reconnaître un disparu. Mais, bien plus, certains éléments anatomiques posent des problèmes redoutables (par exemple le positionnement de la pointe nasale), et certains détails subtils ne peuvent être retrouvés, alors même qu'ils font toute la personnalité du visage, et peuvent être très importants pour favoriser la ressemblance entre le visage réel du sujet et la reconstruction, et donc pour la reconnaissance par les proches.

Malgré les nuances exprimées ci-dessus, la reconstruction faciale a connu certains succès, souvent fortement médiatisés. Cela étant dit, sur un plan strictement scientifique, la seule question importante est de savoir quel est le pourcentage de cas où on obtient une ressemblance au moins moyenne (voire excellente), qui justifie la poursuite des efforts de recherche dans ce domaine. En effet le fait d'aboutir à une identification dans certains cas particuliers ne prouve pas que la reconstruction faciale fût réellement ressemblante. Il faut donc développer des programmes de validation pour comprendre les difficultés de la reconstruction pour certaines parties du visage, mais aussi les phénomènes neuropsychologiques de ressemblance et de reconnaissance du visage, et de façon pragmatique l'amélioration de la présen-

tation des résultats pour que ceux-ci soient les plus performants possibles.

Historiquement les premières reconstructions faciales furent développées par les anatomistes allemands à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle pour identifier des personnages historiques. Plus tard Gerasimov (1949, 1955, 1971) a développé sa méthode tridimensionnelle manuelle et l'a utilisée sur des spécimens paléontologiques, puis dans des affaires médico-légales. Par la suite diverses méthodes, bidimensionnelles ou tridimensionnelles, ont été proposées dans la littérature (Aulsebrook *et al.*, 1995; Quatrehomme et Îscan, 2000).

#### 4.1. Analyses préliminaires (Quatrehomme et Subsol 2005)

Quelle que soit la technique utilisée, la reconstruction faciale nécessite une *analyse anthropologique* rigoureuse, à la fois directement sur le crâne à identifier et sur des radiographies céphalométriques. Sur le crâne, des mensurations classiques horizontales et verticales sont effectuées, des indices et des angles calculés ou mesurés, donnant la forme générale du crâne et du visage. Par exemple le rapport glabellonasion (ou nasion-pogonion) sur la largeur bizygomatique donne la forme plus ou moins allongée ou arrondie du visage. Des indices peuvent être calculés, rapports de deux longueurs crâniennes (indices crâniens), faciales (indices faciaux), ou d'une longueur crânienne et d'une longueur faciale (indices crânio-faciaux, comme l'indice crâniofacial transversal). Certains angles sont très utiles pour la reconstruction faciale, comme l'angle frontal (entre la droite bregma-nasion, et le plan de Francfort), occipital (entre les droites lambda-inion et inion-opisthion), et l'angle de Schwalbe (entre les droites glabellonasion et glabellonasion). Ces angles peuvent être calculés mathématiquement à partir de mesures simples effectuées sur le crâne (Paysant et Quatrehomme, 2002), ou mesurées sur des radiographies céphalométriques.

De la même façon, on tente de définir le statut gnathique du sujet, en mesurant ou calculant les angles. On distingue ainsi les angles du profil facial total, du profil nasal, et du profil alvéolaire, permettant la classification en prognathisme, mésognathisme, ou orthognathisme (figure 6.1).

L'indice gnathique est un moyen rapide de connaître le statut gnathique du sujet, puisqu'il s'agit du rapport entre la longueur du splanchnocrâne (basion-prosthion), et la longueur du neurocrâne (basion-nasion).

Un autre angle important est l'angle facial (fig. 6.2), traduisant le degré de rétrusion ou de protrusion du menton par rapport au nasion. Il faut tracer la ligne

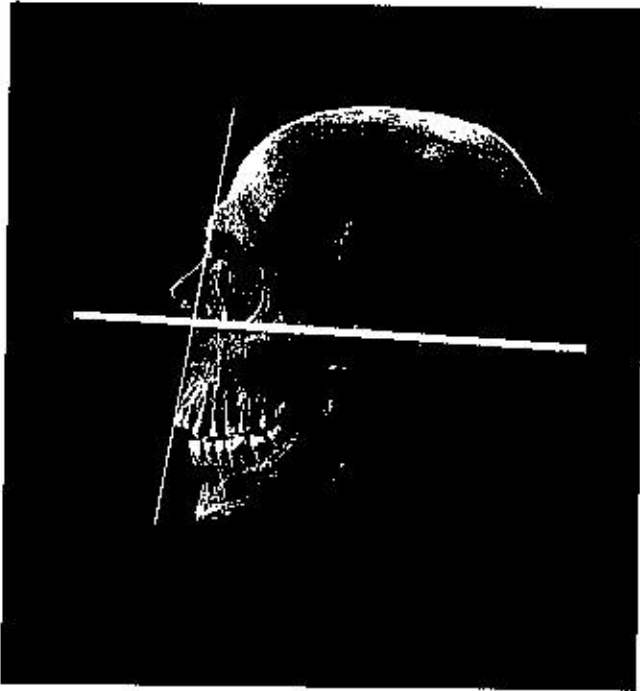


Fig. 6.1. Angle du profil facial total, déterminé par la droite nasion-prosthion et le plan de Francfort, définissant le « prognathisme total ». L'angle considéré est antérieur et inférieur.

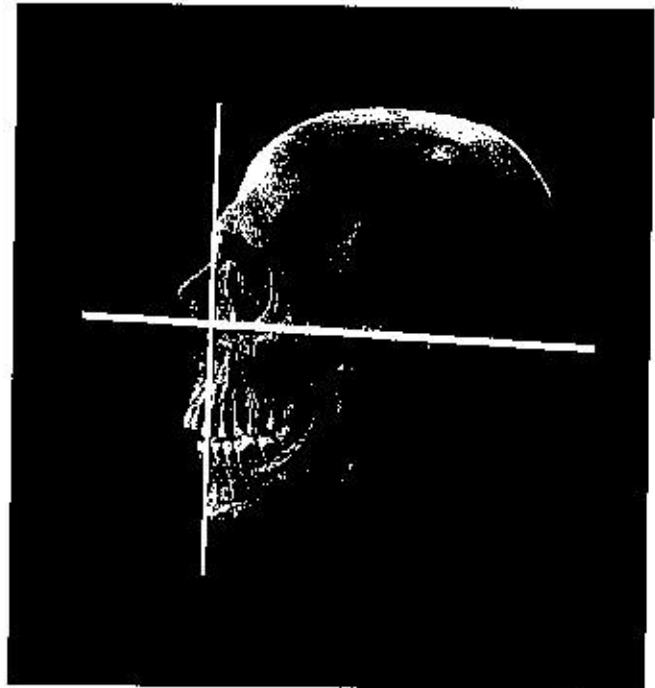


Fig. 6.2. Angle facial, entre la droite nasion-pogonion et le plan de Francfort, étudiant la rétrusion ou protrusion du menton. L'angle considéré est postérieur et inférieur.

nasion-pogonion, et l'angle facial est inférieur et postérieur, à l'intersection de la ligne nasion-pogonion et du plan de Francfort.

On recherche ensuite des déséquilibres horizontaux ou verticaux, sujet bien connu des orthodontistes et des chirurgiens maxillo-faciaux. Une méthode simple a été décrite par George (1987, 1993), mais il existe des techniques multiples et variées, plus ou moins complexes (voir en particulier Delaire, 1978, et Quatrehomme, 2000).

Il existe quatre types faciaux fondamentaux, et de nombreuses combinaisons.

Les quatre types fondamentaux sont :

- soit des déséquilibres verticaux :
  - deep-bite (petite hauteur faciale inférieure par rapport à la hauteur faciale supérieure ; et grande hauteur faciale postérieure par rapport à la hauteur faciale totale antérieure),
  - et open-bite (l'inverse de la précédente) ;
- soit des déséquilibres antéro-postérieurs :
  - classe II squelettique (protrusion maxillaire ou rétrusion mandibulaire, ou les deux),
  - ou classe III squelettique (rétrusion maxillaire, ou protrusion mandibulaire, ou les deux).

La classe I squelettique est la normalité. La classe II squelettique montre un recul global et réel de la

mandibule par rapport à la base du crâne. Inversement la classe III squelettique est une avancée globale de la mandibule par rapport aux maxillaires supérieurs et à la base du crâne.

Ces déséquilibres squelettiques peuvent être facilement mis en évidence, notamment sur une radiocéphalométrie de profil, par les angles SNA (selion-nasion-point A ; le selion est situé au niveau de la selle turcique, et le point A est le point le plus profond de la concavité entre la base de l'épine nasale antérieure, et le prosthion), SNB (fig. 6.3) (selion-nasion-point B ; le point B est le point le plus profond de la concavité entre l'infradentale, équivalent du prosthion sur la mandibule, et le pogonion), SNPr (selion-nasion-prosthion), et SNPog (selion-nasion-pogonion).

Ces angles permettent d'observer la présence d'un éventuel prognathisme maxillaire (SNA), mandibulaire (SNB), alvéolaire (SNPr), ou mentonnier (SNPog). La différence entre les angles SNA et SNB permet d'établir les rapports entre les bases maxillaire et mandibulaire.

L'étude de l'occlusion est également très importante, conditionnant en grande partie la forme des lèvres, et en partie la forme du visage. On distingue les troubles de l'occlusion sagittaux (mésiodistocclusion), transversaux (articulé inversé, vestibulocclusion,



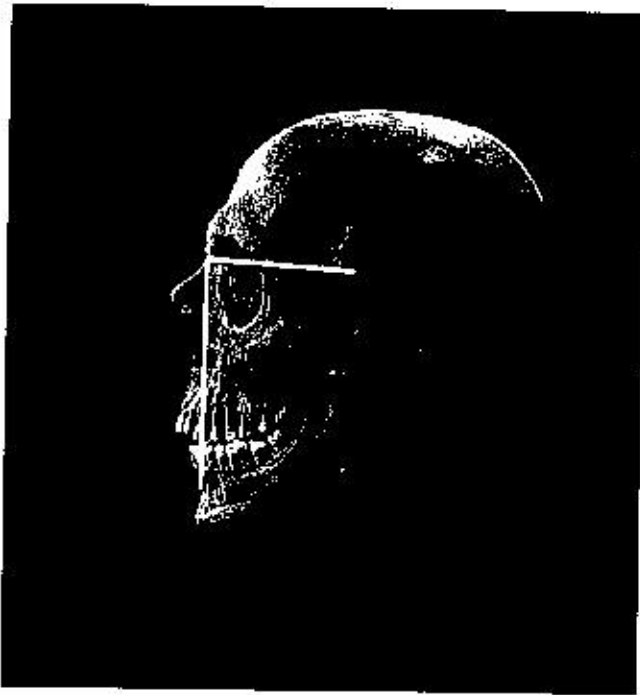


Fig. 6.3. Angle selion-nasion-point B ou SNB, mettant en évidence une éventuelle anomalie gnathique par décalage de la base mandibulaire. De la même façon, les angles SNA, SNPr et SNPog étudient les anomalies gnathiques maxillaire, alvéolaire, et mentonnière, respectivement.

linguoclusion), et verticaux (supraclusion, infraclusion).

On définit **trois classes sagittales d'occlusion** (classes I, II, et III d'Angle), que l'on établit par rapport aux positions respectives des premières molaires et des canines supérieures par rapport à leurs homologues inférieures, et au surplomb des incisives.

La **classe I** est l'occlusion normale.

Dans la **classe II**, la mandibule semble s'être distalisée par rapport au maxillaire supérieur (déplacement apparent de la mandibule vers l'arrière, par rapport au maxillaire supérieur); l'occlusion normale est ici exagérée.

La classe II est subdivisée en II<sub>1</sub> et II<sub>2</sub> en fonction de l'inclinaison (vestibuloversion ou linguoversion, respectivement) des incisives centrales supérieures.

Dans la **classe III**, la mandibule semble s'être au contraire mésialisée par rapport au maxillaire supérieur (déplacement apparent de la mandibule vers l'avant, par rapport au maxillaire supérieur); l'occlusion est ici inversée.

On se souviendra qu'il peut exister des anomalies occlusales avec ou sans décalages des bases osseuses, donc avec ou sans déséquilibre squelettique. Les particularités comme la présence d'un diastème dentaire, la vestibulo ou linguoversion des incisives centrales supérieures, les anomalies du surplomb incisif, la présence

de convexités au niveau de la partie basse du corps externe mandibulaire, sont recherchées et notées avec précision.

Les **radiographies céphalométriques** sont d'une très grande utilité. Elles servent d'une part à préciser les déséquilibres squelettiques et les malocclusions dont nous avons parlé ci-dessus, et d'autre part à effectuer une reconstruction 2D sur la céphalométrie de profil, selon la technique de George (voir ci-dessous), préalable indispensable à toute reconstruction. Les radiographies céphalométriques sont utilisées de façon routinière en orthodontie et chirurgie maxillo-faciale pour corriger les déséquilibres crânio-faciaux et les malocclusions, elles sont donc parfaitement standardisées et reproductibles, avec une distorsion et un agrandissement radiologique négligeables. L'orientation est le plan de Francfort.

Ainsi donc ces éléments préliminaires (analyse anthropologique, céphalométrique, et odontologique) permettent d'appréhender certains caractères morphologiques particuliers à chaque cas. Des hypothèses sur la forme du crâne et du visage, et sur certaines particularités, sont proposées avant de débiter la reconstruction.

#### 4.2. Épaisseurs des tissus mous

La reconstruction faciale a surtout débuté par l'hypothèse des épaisseurs des parties molles. La notion de matrice osseuse supportant les parties molles s'accompagne de multiples recherches tentant de retrouver des épaisseurs moyennes en certains points anthropologiques, et d'établir ainsi une relation mathématique entre les structures osseuses et les parties molles. Les mesures de parties molles se sont faites surtout sur le cadavre (Welcker, 1883; His, 1895; Domaracki et Stephan, 2006), parfois en distinguant plusieurs statuts pondéraux. Cette approche sur le cadavre souffre de nombreuses critiques bien connues: les points anthropologiques ne sont pas toujours localisés avec exactitude en palpant la face du cadavre; les altérations cadavériques (déshydratation, décomposition) modifient les épaisseurs des parties molles; les méthodes de mesure (à l'aiguille) sont très rudimentaires. C'est la raison pour laquelle la tendance récente est la mesure des épaisseurs des parties molles *in vivo*, sur des radiographies latérales (Dumont, 1986), par ultrasons (Hodson *et al.*, 1985), tomodensitométrie, ou toute autre méthode. Certains auteurs ont suggéré des mesures *in vivo* en position verticale et non couchée, pour éviter des relâchements tissulaires dus à la pesanteur (Aulsebrook, 2000).

Indéniablement on observe de nombreuses variations d'épaisseur des parties molles, d'un individu à

l'autre (ce qui se traduit mathématiquement dans une série par une moyenne, un écart-type, un minimum et un maximum), d'un sexe à l'autre, selon le groupe biologique et selon le statut pondéral, mais aussi selon l'âge (Moore, 1981; Lebedinskaya *et al.*, 1993; Rhine et Campbell, 1980; Rhine, Moore et Weston, 1982; De Greef *et al.*, 2005, 2006). Il existe des tables de référence tenant compte de ces différents facteurs. Le statut pondéral ne peut en aucun cas être connu à partir des os, mais en situation médico-légale, les restes encore analysables peuvent parfois donner cette information. Certains auteurs (Vignal, 2000) ont calculé l'épaisseur des parties molles en fonction de l'indice de masse corporelle (ou Body Build Index de Davenport), qui représente le poids divisé par le carré de la taille.

Cependant la connaissance des épaisseurs des parties molles est loin de résumer les problèmes posés par la reconstruction faciale (ce qui est démontré par la possibilité de reconnaître aisément une caricature, alors que les épaisseurs des parties molles sont dans ce cas complètement modifiées). Il est certain que c'est surtout la relation et l'équilibre entre les structures nobles du visage qu'il est important de comprendre (Quatrehomme, 2000), pour espérer un respect des proportions du visage, et donc faciliter une reconnaissance par les proches (Rakover, 2005).

Les « canons artistiques » ne sont pas d'une grande utilité pour la reconstruction faciale, pour deux raisons: il ne s'agit que d'indications générales, non applicables à un cas particulier; et ils se révèlent en général très approximatifs, voire faux, quand on tente de les valider scientifiquement. Par exemple la hauteur crânio-faciale tissulaire peut être divisée en deux (vertex-nasion = nasion-menton), en trois (trichion-nasion = nasion-sous-nasal = sous-nasal-menton), ou en quatre parties (vertex-trichion = trichion-glabelle = glabelle-sous-nasal = sous-nasal-menton). Or le respect de la division en deux parties n'existe que dans 10% des cas, et les autres proportions ne sont jamais obtenues (Farkas et Munro, 1987).

### 4.3. Méthodes bidimensionnelles manuelles

On distingue le dessin et la méthode crâniographique latérale de George. Le *dessin* est effectué par des « artistes médico-légaux » (« forensic artists »). Ces artistes travaillent sous l'autorité d'un médecin légiste, anthropologue, ou odontologiste, qui procède à l'identification classique (âge, sexe, stature, groupe biologique), et à l'identification de particularités individuelles, ce qui aidera l'artiste dans sa réalisation. L'artiste travaille habituellement à partir d'une photographie

de crâne 1/1, avec des marqueurs indiquant les épaisseurs moyennes sur certains points anthropologiques, puis il dessine la reconstruction du visage. La principale critique est le risque de subjectivité de la réalisation, l'artiste tentant d'humaniser son résultat, avec la possibilité de s'éloigner d'une méthode scientifique et de se rapprocher d'une méthode artistique. Le résultat en 2D est sans doute moins réaliste qu'un résultat 3D, encore que l'humanisation compense sans doute en partie ce problème. Malgré toutes ces critiques, certains succès ont été publiés dans la littérature (Taylor, 1990; Taylor, 2001).

La *méthode crâniographique latérale de George* (1987) a pour objectif de reconstruire le profil d'un sujet à partir de la radiographie céphalométrique du crâne de profil. George travaille sur un échantillon caucasioïde de sujets américains de sexe masculin âgés de 14 à 36 ans (N = 17), et de sexe féminin âgés de 14 à 34 ans (N = 37). Dans un premier temps, George (1987) mesure, à partir des radiocéphalométries de profil, la moyenne des épaisseurs des parties molles en certains points anthropologiques, ou en certains points construits géométriquement à partir du crâne osseux.

Globalement, le résultat est intéressant, car il évite des erreurs importantes sur le profil du sujet. Le profil stylisé de ce type ne peut pas a priori permettre une identification par les proches, mais est à notre avis un préalable indispensable à toute autre technique de reconstruction faciale. Les points osseux utilisés sont la supraglabelle, la glabelle, le nasion, le nasal, le sous-spinal (ou point A), le supramental (ou point B), le suprapogonion, le pogonion, le gnathion, et le menton. Les points tissulaires en regard sont soit des perpendiculaires directes (par exemple en regard de la supraglabelle, de la glabelle), soit des droites tracées avec un angle (par exemple le point tissulaire en regard du nasion osseux est tracé sur une droite faisant un angle réel que (nasion osseux-selle turcique-nasion tissulaire) fasse un angle de 4 degrés. Certaines constructions sont plus complexes, comme la construction du plan sous-nasal, la mise en place de la pointe nasale (ou pronasal). Certains éléments sont difficiles à mettre en place, comme l'angle nasal (entre la face inférieure du nez et le plan horizontal).

Comme nous l'avons déjà mentionné, l'épaisseur des parties molles en un point anthropologique donné n'est qu'un des aspects du problème de la reconstruction faciale, alors que le positionnement et la relation entre certains éléments clés du visage est fondamental. Par exemple le positionnement de la pointe nasale, le positionnement de la commissure labiale, l'épaisseur des lèvres ont toujours fait l'objet de nombreuses discussions. Macho (1986) travaille sur un échan-

tillon de 154 radiographies latérales d'hommes, et 199 femmes originaires de Vienne (Autriche). Il donne des équations permettant l'estimation de la hauteur et de la longueur nasales. *Odin et al.* (2000) établissent la présence d'une corrélation entre des distances en projection sur une droite parallèle ou perpendiculaire au plan de Francfort, et le pronasal.

#### 4.4. Méthodes tridimensionnelles manuelles

On peut distinguer la méthode morphologique (ou morphoscopique, ou anatomique), consistant à mettre en place les différents éléments anatomiques («muscles», «glandes salivaires», «espaces graisseux»), avant de recouvrir l'ensemble avec une couche «cutanée». Et la méthode morphométrique, qui ne se préoccupe que de l'épaisseur des parties molles en certains points anthropologiques. Dans l'état actuel des connaissances, nous ne savons pas quelle technique donne les meilleurs résultats en terme de ressemblance, puisqu'il n'y a pas eu d'évaluation contrôlée de comparaison des deux méthodes avec une grande série.

La reconstruction tridimensionnelle manuelle, appelée aussi reconstruction «sculpturale», est la méthode de reconstruction probablement la plus populaire, expérimentée ou utilisée par les médecins légistes, odontologistes, anthropologues, scientifiques ou artistes médico-légaux. La phase préliminaire de la reconstruction est la même que précédemment (études anthropologique, céphalométrique et odontologique rigoureuses), et nous recommandons une reconstruction préliminaire latérale 2D de George. La reconstruction manuelle 3D proprement dite débute par la mise en place de marqueurs en des points anthropologiques précis. Ces points sont ceux dont les épaisseurs tissulaires moyennes sont publiées dans la littérature, et on installe donc un marqueur dont l'épaisseur est celle de l'épaisseur tissulaire moyenne du point considéré. Puis les espaces entre les points sont progressivement comblés par une substance modelable et facile à travailler. La forme générale du visage est ainsi reconstruite, en s'aidant de conseils généraux publiés dans la littérature (Tableau 6.2). Le contour supérieur du crâne (en norma frontalis) définit quatre types morphologiques fondamentaux (Fedosyutkin et Nainys, 1993): demi-sphère, pentagone, ovale, et rectangle. Le contour inférieur du visage définit également quatre types morphologiques (Fedosyutkin et Nainys, 1993): une variante large (ronde ou carrée), et une variante étroite (ovalaire ou triangulaire).

Mais la grande difficulté est de reconstruire, une nouvelle fois, les éléments nobles du visage (yeux, nez,

Tableau 6.2: Forme générale du visage.

Partie supérieure	
Front	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Suit le plan osseux</li> <li>- Ajouter 10 mm juste au-dessus du rebord orbitalre supérieure (Krogman et İşcan, 1986)</li> </ul>
Région temporale	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ajouter 12 à 14 mm pour le muscle temporal (Krogman et İşcan, 1986)</li> </ul>
Région pariétale	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Suit le plan osseux</li> </ul>
Région occipitale	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Suit le plan osseux</li> </ul>
Vertex	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ajouter 2 à 3 mm (Krogman et İşcan, 1986)</li> </ul>
Cheveux	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Informations disponibles (par la famille, ou par l'autopsie des restes)</li> <li>- Informations non disponibles                             <ul style="list-style-type: none"> <li>Homme: cheveux courts classiques</li> <li>Femme: cheveux mi-longs classiques</li> </ul> </li> <li>- Ligne d'implantation des cheveux                             <ul style="list-style-type: none"> <li>Transition entre surface lisse du front, et petits tubercules rugueux (loupe binoculaire à faible grossissement) (Fedosyutkin et Nainys, 1993)</li> <li>- Ajouter 5 à 6 mm au-dessus de la courbe maximale du front (Krogman et İşcan, 1986)</li> </ul> </li> </ul>
Arcades	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La proéminence des arcades doit être traduite sur le plan tissulaire</li> </ul>
Partie inférieure	
Variantes morphologiques du visage:	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Variante étroite: angle goniale &gt; 125° et/ou processus coronoïde haut (Fedosyutkin et Nainys, 1993)</li> <li>- Variante large: angle goniale &lt; 125° et/ou processus coronoïde large et bas (Fedosyutkin et Nainys, 1993)</li> </ul>
Contour mandibulaire	<ul style="list-style-type: none"> <li>- suit grossièrement le contour osseux de la mandibule</li> </ul>
Convexités sur le bord externe du ramus horizontal: à traduire sur le plan tissulaire	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sous-mentonnier: ajouter 5 mm (Krogman et İşcan, 1986)</li> </ul>

bouche et lèvres, menton, oreilles). Cette reconstruction nécessite de l'expérience. On se sert de la reconstruction 2D du profil de George, mais également de guides généraux de la reconstruction faciale, publiés dans la littérature. Ces éléments sont une aide incontestable, mais ils ne sont pas toujours validés scientifiquement.

La reconstruction nasale résume bien les difficultés générales de la reconstruction crânio-faciale (Quatrehomme et İşcan, 2000). Le massif nasal peut être assi-



milé grossièrement à un triangle de profil, dont il faut positionner trois côtés pour mettre en place le pronasal (pointe nasale tissulaire) (Stephan *et al.*, 2003). La distance réelle oblique entre la nasion et le pronasal, et la forme du dorsum nasal et de l'extrémité nasale, posent des problèmes redoutables. En effet le massif nasal présente une partie osseuse, puis une partie cartilagineuse, puis une extrémité pratiquement libre. Seule la partie supérieure est sous-tendue par l'os : la partie haute du nez suit grossièrement les os propres du nez, mais il existe d'importantes difficultés pour les parties molles situées en dessous du rhinion.

De plus, en situation médico-légale réelle, les parties cartilagineuses ont volontiers disparu quand on effectue une reconstruction médico-légale, et il n'est pas rare de surcroît que l'épine nasale soit fracturée. Les proportions idéales du nez (par exemple 2/5, 2/5 et 1/5 pour le dorsum nasal), ne sont que théoriques. Le bridge nasal est convexe, droit, ou concave, étroit ou large. Ceci est en grande partie suggéré par la forme des os nasaux et leur direction.

Le sous-nasal, équivalent tissulaire du sous-spinal osseux (base de l'épine nasale) est habituellement situé au-dessous du sous-spinal (environ 1,4 mm chez le caucasöide: Caldwell, 1986). La plupart des auteurs positionnent le pronasal à l'intersection de deux droites : une tangente au tiers terminal du dorsum nasal osseux, et une dans la continuité de l'épine nasale (Gerasimov, 1971; Caldwell, 1986; Rogers, 1987; Fedosyutkin et Nainys, 1993). Dans ces conditions, l'inclinaison de l'épine nasale a une très grande influence sur la position du pronasal. Ce positionnement est cependant assez grossier, car il a été démontré qu'il y avait de nombreuses variations.

La pointe nasale, outre le problème de son positionnement (pronasal), présente de grandes variations morphologiques, difficiles à prévoir à partir des éléments osseux (Macho, 1989). Les variations ethniques sont classiques (aspect assez pointu de la pointe nasale chez le caucasöide, aspect plutôt arrondi chez le négroïde ou le mongoloïde), mais il ne s'agit que d'indications générales.

La distance bilatrale définit la largeur du nez au niveau des narines. Elle a fait l'objet de nombreux travaux avec des appréciations variables. À partir de 197 crânes et masques mortuaires de la Terry collection il a été démontré qu'il faut ajouter en moyenne, à l'ouverture piriforme, 12,2 mm chez le sujet caucasöide de sexe masculin, et 16,8mm chez le sujet négroïde de sexe masculin (Hoffman *et al.*, 1991).

La reconstruction oculaire nécessite de positionner le globe oculaire dans les trois dimensions de l'espace. Si on considère que le globe oculaire a un axe

antéro-postérieur sagittal, cet axe fait un angle de 20° avec l'axe de l'orbite, qui est oblique en avant et en dehors (Pouliquen, 1984). Dans la direction antéro-postérieure, la cornée est tangente ou dépasse légèrement une ligne tracée du rebord orbitaire supérieur au rebord orbitaire inférieur (Rouvière, 1970; Gatliff et Snow, 1979), et qui partage l'orbite en deux parties égales (Rouvière, 1970). Cette ligne n'est pas verticale mais oblique en bas et en arrière. Si on trace une ligne joignant le bord interne au bord externe de l'orbite, cette ligne est oblique en dehors et en arrière et rencontre le globe oculaire un peu en arrière de la cornée.

Le positionnement vertical du globe est défini par la position de la pupille. Celle-ci est située de façon variable selon les auteurs; au milieu de la hauteur de l'orbite (Fedosyutkin et Nainys, 1993), aux trois cinquièmes supérieurs de la hauteur de l'orbite, ou au croisement de la ligne verticale tracée au milieu de l'orbite, du rebord orbitaire supérieur au rebord orbitaire inférieur, avec la ligne tracée à angle droit, au niveau de la partie la plus large de l'orbite (Aulsebrook, 2000). Dans notre expérience, la pupille est habituellement située au-dessus de la ligne joignant les canthi externe et interne.

La position horizontale du globe est définie par la distance interpupillaire. Cette distance est difficile à calculer avec précision.

On s'aidera des indices anthropologiques habituels de télorisme, et de l'équation de Eisenfeld *et al.* (1975):

$$\text{DIP} = 0,67 (\text{SOP}) + 0,18$$

(DIP: Distance interpupillaire; SOP «séparation osseuse des pupilles», c'est-à-dire la distance entre chaque centre du rectangle orbitaire)

La position des deux canthi, externe et interne, définit la fente palpébrale. Ces positions ont fait l'objet de nombreux travaux, parfois en partie contradictoires, d'autant plus que les canthi s'éloignent chez un sujet robuste ou obèse, et se rapprochent chez un sujet gracile ou mince (Caldwell, 1986). Globalement on retiendra que la ligne joignant les deux canthi se situe au tiers inférieur de la hauteur orbitaire, et non au milieu (Yoshino et Seta, 2000), et que cette ligne n'est pas horizontale mais oblique en bas et en dedans. Le point osseux appelé endocanthion (ou entocanthion, endocanthus) doit être positionné au point d'attachement du ligament palpébral interne, environ à 10 mm sous le dacryon (point de jonction des trois sutures, lacrymomaxillaire, frontomaxillaire, et frontolacrymale) (Aulsebrook, 2000). Le canthus interne (point tissu-

laire) se positionne 3 à 5 mm en dehors du rebord orbitaire interne (Yoshino et Seta, 2000). Le point osseux appelé exocanthion (ou ectocanthion, ectocanthus, exocanthus), est plus haut situé que l'endocanthion (environ 2 mm), en regard du point d'attachement du ligament palpébral externe (tubercule malaire de Whitnall), et en moyenne 3 à 4 mm en dedans de ce tubercule malaire (Caldwell, 1981). Le canthus externe (point tissulaire) se positionne 3 mm (Sills, 1994) ou 5 mm (Krogman et İşcan, 1986) en dehors du rebord orbitaire, ou sur ou légèrement en dedans ce rebord orbitaire externe (Yoshino et Seta, 2000).

La paupière supérieure est située dans la moitié supérieure de l'orbite et couvre le tiers supérieur de l'iris, alors que la paupière inférieure est tangente au bord inférieur de l'iris. Les limites des paupières répondent aux rebords orbitaires (Krogman et İşcan, 1986). L'orifice palpébral mesure 3 cm par 1,5 cm environ en position ouverte (Krogman et İşcan, 1986). Le sourcil voit son bord inférieur suivre le bord supérieur de l'orbite, mais est volontiers plus haut situé, à 3 à 5 mm au-dessus (Yoshino et Seta, 2000). Les variations de la reconstruction oculaire sont nombreuses.

**La reconstruction de la région buccale** est également très délicate (Stephan et Henneberg, 2003). Pour Taylor et Brown (1998), la forme des lèvres ne peut être déterminée de façon exacte à partir du crâne, car la hauteur labiale, le contour des lèvres, leur remplissage, est éminemment variable en fonction du sexe, de l'âge, de l'édentation éventuelle, du groupe biologique. Par exemple l'épaisseur des lèvres est plus importante chez le sujet négroïde, avec tendance à l'éversion. Certaines malocclusions dentaires tendent à produire des particularités au niveau des parties molles. Cependant, les relations avec les structures osseuses sous-jacentes sont certaines (Subtelny, 1959), et en partie liées à la classe squelettique et la classe d'occlusion d'Angle (Burstone 1958, 1967). Gerasimov (1949, 1971) donne également des exemples du retentissement de l'occlusion sur la forme de la région buccale.

La largeur bichéilion, qui représente la largeur de la fente labiale, est estimée généralement équivalente ou très proche de la largeur interpupillaire (Sills, 1994), ou encore se projette dans la zone canine-première prémolaire (Krogman et İşcan, 1986; Rogers, 1987). La fente labiale est horizontale ou légèrement convexe, vers le haut ou vers le bas. La hauteur labiale est en général considérée comme celle de la hauteur de l'émail des incisives supérieures et inférieures (Fedosyutkin et Nainys, 1993). La moyenne pour la lèvre supérieure serait de 25 mm chez l'homme et 20 mm chez la femme. Il existe une diminution avec l'âge (Caldwell, 1986). L'occlusion normale se fait sans

contrainte. Un relâchement aboutit à une légère séparation des lèvres. Le stomion est localisé à l'union des trois-quarts supérieurs et du quart inférieur de l'incisive centrale supérieure chez l'homme, et l'union des deux tiers supérieurs et du tiers inférieur chez la femme (George, 1987).

Dans un plan antéro-postérieur, la lèvre supérieure est en avant d'un plan sous-nasal-pogonion ( $3,5 \pm 1,4$  m) et la lèvre inférieure est légèrement en arrière de la lèvre supérieure (en avant du plan sus décrit de  $2,2 \pm 1,6$  mm), sans différence significative entre l'homme et la femme (Burstone, 1967). L'épaisseur des lèvres est normalement contenue à l'intérieur d'une ligne pronasal-pointe du menton sur le profil (Ricketts, 1968). Chez le caucasöïde, le contour touche la ligne, alors que chez le négroïde, le contour se projette un peu en avant de cette ligne.

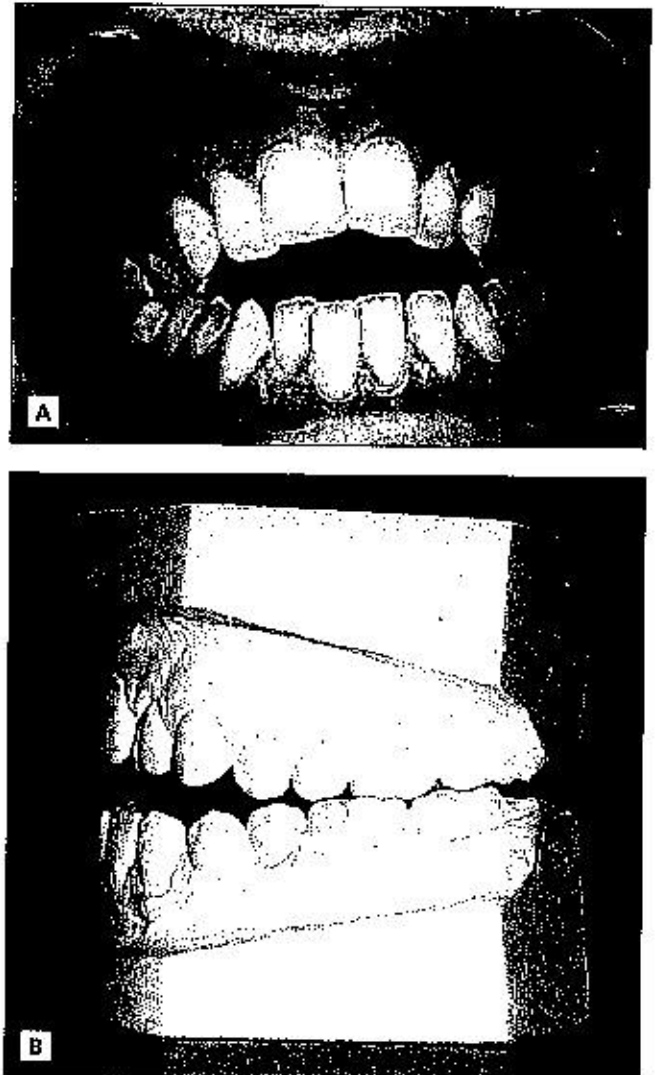
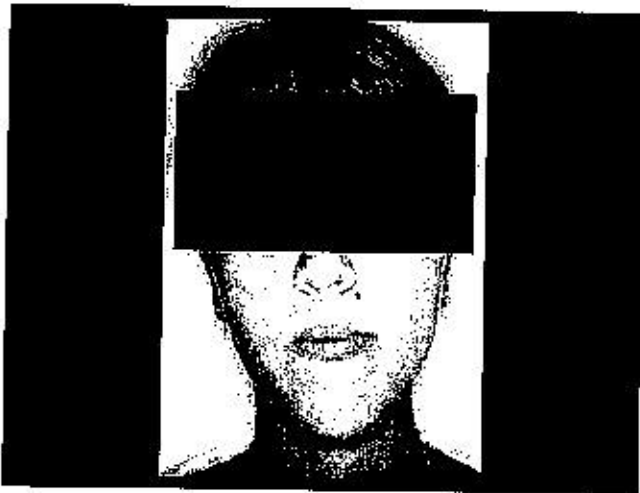


Fig. 6.4. Openbite. L'occlusion est impossible. La figure A correspond au moulage du cas clinique de la figure B.



**Fig. 6.5.** Openbite. Du fait de l'impossibilité de l'occlusion, le patient doit forcer constamment l'orbiculaire des lèvres pour parvenir à une occlusion labiale complète, ce qui augmente l'épaisseur des lèvres. La figure 6.5 correspond au cas clinique de la figure 6.4 A et B.

La pathologie a une grande influence sur la région buccale. Le plus évident est la prochéilie observée en cas de protrusion dentaire (et inversement rétrochéilie). En cas d'openbite (fig. 6.4), l'occlusion n'est possible qu'avec une action forcée de l'orbiculaire, donc on observe une augmentation de l'épaisseur des lèvres (fig. 6.5).

Gerasimov (1955) reconnaît six types d'occlusion au niveau incisivo-canin (occlusion inversée, bout-à-bout incisif, occlusion normale; overjet moyen, overjet très important, béance). Un développement alvéolaire prononcé au niveau de la mandibule entraîne un retentissement labial et sous-labial.

La **reconstruction auriculaire** est très délicate car il n'existe pas de support osseux, et on observe de très nombreuses variations. Cependant la plupart des oreilles reste dans une certaine norme. Le grand axe de l'oreille est proche de celui des os propres du nez (Broadbent et Matthews, 1957), entre 15 et 30° par rapport à la verticale (Gatliff et Snow, 1979). La hauteur de l'oreille est proche de la distance nasion-pronasal (Fedosyutkin et Nainys, 1993), ou encore la largeur de la bouche, c'est-à-dire la distance bicheilion (Rogers, 1987). Le sommet de l'oreille est proche de celui de la glabelle ou des sourcils, et l'extrémité inférieure proche de la pointe nasale. L'attachement supérieur de l'oreille est proche de la ligne oculaire (Broadbent et Matthews, 1957). La largeur de l'oreille représente environ 50 à 65 % de sa hauteur (Tolleth, 1978; Rogers, 1987).

La **reconstruction du menton** montre également de nombreuses variations. En général le menton mou est plus marqué, carré, et robuste chez l'homme, plus

arrondi voire pointu chez la femme. Sa forme est classée en ronde, rectangulaire, ovale, ou triangulaire (Fedosyutkin et Nainys, 1993). Les tissus mous suivent en grande partie la matrice osseuse sous-jacente, bien que les interrelations entre menton osseux et menton tégumentaire soient multifactoriels donc montrent une variabilité certaine (Lévignac, 1988) (par exemple du fait de l'élasticité variable de la peau, et de l'accumulation de graisse, difficilement prévisible). De plus le menton n'est pas isolé, et il existe certainement un complexe bucco-mentonnier, avec des interrelations et un équilibre entre chaque élément. Les particularités voire la pathologie d'occlusion ou squelettique, jouent un rôle certain dans la forme du menton, comme de la bouche et des lèvres.

Certaines particularités du menton sont liées à une anomalie occlusale ou squelettique, mais d'autres sont imprévisibles. On se souviendra que le suprapogonion est le point de la plus grande épaisseur du menton (George, 1987). En clinique, on observe que le revêtement musculaire et tégumentaire peut venir aggraver ou masquer une anomalie du profil squelettique, et que les déplacements des parties molles secondaires à des déplacements osseux chirurgicaux sont parfois difficiles à prévoir, car le déplacement tissulaire dépend à la fois de l'amplitude du déplacement osseux, mais aussi du sens du déplacement. La ptose mentonnière n'est pas toujours liée à une anomalie dento-squelettique comme la promandibulie. Le «menton de sorcière» (witch chin) est dû à une chute adipeuse de la pointe, avec un sillon sous-mental très prononcé. Le comblement cervico-mentonnier se voit volontiers en cas de rétrusion mandibulaire, mais aussi quand l'os hyoïde et les muscles sus-hyoïdiens ont une position basse et antérieure (Diner *et al.*, 1988). Les gonions largement en relief, voire exoversés, élargissent la face inférieure (Fedosyutkin et Nainys, 1993).

L'étude du menton doit s'intégrer dans l'étude plus générale de la face (cette réflexion est vraie pour n'importe quelle partie de la face, car il y a un retentissement, une interactivité permanente entre les différentes régions de la face, et l'expérience montre qu'il existe, sauf cas hors normes, un équilibre général du visage). On peut donc parler de région bucco-labio-mentonnière.

Globalement on peut souligner une nouvelle fois que l'épaisseur des parties molles ne représente qu'un aspect du problème. Sur des observations contrôlées, on observe que le respect des proportions, l'équilibre et la relation entre les parties nobles du visage sont primordiaux. D'autre part le statut pondéral comme les caractères aléatoires, pileux, chromatiques, ou sociaux, jouent un rôle malheureusement important dans la



possibilité de reconnaissance par les proches. Le rendu des résultats de face n'est peut-être pas la meilleure solution, car le trois-quarts avant est plus naturel, et atténue certaines erreurs (comme la longueur du nez par exemple), alors que le profil strict les accentue.

#### 4.5. Validation scientifique de la reconstruction faciale

Ce qui domine est cependant la rareté des validations scientifiques en terme de ressemblance. En effet le fait d'aboutir à l'identification du sujet ne signifie nullement que la reconstruction était ressemblante, donc scientifiquement réussie (Stephan, 2003; Stephan et Arthur, 2006; Stephan et Henneberg, 2001, 2006). Il peut s'agir d'une coïncidence, d'une ressemblance fortuite, d'une stimulation de la mémoire des proches.

Sadler (1991) réalise une reconstruction crânio-faciale en aveugle sur un crâne, puis compare le résultat avec le masque mortuaire du sujet. La ressemblance entre les deux visages est indéniable. Cependant une critique très fréquente de la reconstruction faciale est que, pour un même crâne, deux scientifiques et/ou artistes différents peuvent réaliser des visages totalement différents. Mais Helmer *et al.* (1993) démontrent que deux équipes indépendantes peuvent aboutir à des résultats proches, à partir du même crâne, ce qui prouve que les éléments scientifiques ont été prépondérants dans cette expérience.

Quatrehomme (2000) étudie 24 observations contrôlées, dans laquelle les reconstructions tridimensionnelles manuelles sont effectuées à l'aveugle, puis comparées, soit à la photographie *post mortem*, soit à un moulage mortuaire du visage du sujet. Globalement les résultats sont considérés, en terme de ressemblance, comme bons dans 5 cas sur 24, moyens dans 4 cas sur 24, et médiocres dans 15 cas sur 24. Parmi les bons résultats, certains sont excellents en terme de ressemblance. On notera également que les résultats se sont nettement améliorés au fur et à mesure de l'expérimentation, alors que le protocole s'affinait progressivement (par exemple 6 cas sur 8 considérés comme bons ou moyens, en terme de ressemblance, dans le dernier groupe d'observations, où un protocole complet de reconstruction faciale a été utilisé). Si on part de l'hypothèse que les résultats bons ou moyens seraient probablement reconnus par les proches, on aboutit à un résultat global de 9 sur 24 (soit 37,5 %) de satisfaction, et même de 6 cas sur 8 (75 %) pour le dernier groupe d'observations. Naturellement ces échantillons sont encore de trop petite taille pour avoir une idée définitive sur le pourcentage exact de bons résultats, en terme de ressemblance.

#### 4.6. Méthodes informatisées

Les difficultés de la reconstruction faciale tridimensionnelle manuelle ont été rapportées dans la littérature. On soulignera d'une part le temps nécessaire à une reconstruction manuelle, et d'autre part une certaine subjectivité, puisque nous ne connaissons les épaisseurs des parties molles qu'en certains points anthropologiques, que certains éléments ne pourront probablement jamais être déduits de la matrice osseuse, et qu'enfin certains éléments importants en pratique pour que les proches reconnaissent un visage (style des cheveux, barbe, lunettes, caractères chromatiques) ne sont en général pas connus au départ. Les méthodes informatisées tentent donc de répondre à ces problèmes, apportant la rapidité (Shahtom *et al.*, 1996), et réduisant la subjectivité. Les reconstructions faciales informatisées ont été mises au point sur des vues latérales (Walker, 1984) ou frontales (Eisenfeld *et al.*, 1975) bidimensionnelles. Actuellement certaines équipes travaillent sur des reconstructions informatisées tridimensionnelles, certainement beaucoup plus réalistes, et susceptibles d'une rotation à 360° (Claes *et al.*, 2006; Vandermeulen *et al.*, 2006). Assez curieusement, alors qu'une des critiques de la reconstruction faciale manuelle est d'être trop artistique et pas assez scientifique, la critique inverse pourrait être faite pour la reconstruction faciale informatisée, strictement scientifique et non artistique: or un simple contour, sans l'avoir «humanisé» n'est guère identifiable, car une simple silhouette est assez peu discriminante. D'autre part la reconstruction faciale informatisée nécessite un matériel puissant et des équipes informatiques de haut niveau, ce qui explique qu'assez peu d'équipes internationales travaillent scientifiquement sur ce sujet. Un des grands avantages de ces techniques, outre la rapidité et l'absence de subjectivité, est l'introduction de niveaux incomparables d'adaptation, de flexibilité, d'efficacité: par exemple la possibilité de donner plusieurs résultats selon le statut pondéral, les caractères pileux, chromatiques, ou sociaux.

La reconstruction faciale informatisée peut être bidimensionnelle ou tridimensionnelle. Les méthodes bidimensionnelles utilisent soit des procédés simples d'importation d'images, installés dans tous les microordinateurs, soit des logiciels de déformations d'images en deux dimensions. Evenhouse *et al.* (1992) utilisent des algorithmes pour produire une face «moyenne» à partir de plusieurs photographies. Puis cette face standard est mise à l'échelle pour s'ajuster à un crâne marqué par des repères anthropologiques d'épaisseurs des tissus mous, et capturé par vidéo. Miyasaka *et al.* (1995) créent un cadre et des contours faciaux, sur lesquels ils placent des composants faciaux, provenant

d'une base de données de photographies de parties de visages. On voit donc dans ces méthodes qu'il s'agit plutôt d'une importation de composants d'un visage provenant d'une base de données, ou éventuellement d'une moyenne de plusieurs images photographiques. Ces systèmes informatiques sont évidemment capables de produire de nombreuses versions à partir d'un même crâne, mais on impose un jeu précis et spécifique de caractéristiques que l'on choisit, et ceci au détriment des informations scientifiques extraites de l'analyse anatomique, anthropologique, odontologique, et radiocéphalométrique du crâne. La sélection des caractéristiques ou des parties de photographies à partir de la base est par essence très subjective. De plus la reconstruction des zones situées entre les caractéristiques sélectionnées, habituellement par remplissage, ajout de contours et retouche d'images, amène également une subjectivité supplémentaire.

Les procédés de déformation d'images en deux dimensions, volontiers appelées morphing ou warping, qui permettent de passer du crâne bidimensionnel au visage bidimensionnel (Stephan *et al.*, 2005) sont en général précédés de la réalisation d'un visage de synthèse grâce à un logiciel de type portrait robot, puis le logiciel de déformation d'images agit dans un deuxième temps, enfin le logiciel de retouche d'images termine certains détails (Vignal, 2000). L'image de synthèse de type portrait robot, est réalisée en plaçant les différents éléments composites (nez, yeux, lèvres, menton), en fonction de l'analyse préliminaire anthropologique et céphalométrique, dont nous avons déjà parlé. Le positionnement des différents éléments nobles du visage se fait donc scientifiquement (en respectant la position horizontale et verticale des différents éléments), mais cette image n'est qu'une ébauche préliminaire.

Dans un deuxième temps, le crâne est numérisé en deux dimensions, de face, et les épaisseurs de tissus mous sont installées autour du crâne (avec une simple retouche d'image), en respectant les épaisseurs moyennes, tout en gardant la possibilité de varier d'un minimum à un maximum (avec un intervalle de confiance de 95%). On choisit cette épaisseur en fonction du sexe, de l'âge, et de la corpulence que l'on veut reproduire. On reste bien sûr dans les limites autorisées par l'intervalle de confiance, mais on peut modifier le contour en jouant entre le minimum et le maximum autorisé pour obtenir un ensemble équilibré.

Puis l'image du crâne numérisé, avec son contour de tissus mous, et l'ébauche «portrait robot» sont importées par le logiciel de déformation d'images. La déformation se fait du visage ébauche vers le crâne sec avec ses épaisseurs de tissus mous. Globalement

la forme générale et l'équilibre de la face, les proportions, les positions respectives des éléments nobles, sont respectés par ce type de procédés (Vignal, 2000). On peut ensuite ajouter les oreilles, la coiffure... avec le logiciel de type portrait robot, et donner plusieurs versions pour faciliter la reconnaissance par les proches. Certains succès sont incontestables, et certains cas médico-légaux ont permis la comparaison entre le visage réel et le visage reconstruit, montrant un résultat satisfaisant. Cependant nous manquons de validation scientifique en terme de ressemblance sur un nombre suffisant de cas contrôlés.

*Les méthodes tridimensionnelles informatisées* de reconstruction faciale sont développées par de rares équipes internationales, compte tenu des importantes difficultés rencontrées (Vanezis *et al.*, 1989, Tu *et al.*, 2005, Davy *et al.*, 2005).

Cependant le développement actuel est rapide, en particulier dans un but commercial (industrie du cinéma) (Beier et Neely, 1992). La distorsion d'images fait appel à des transformations géométriques des images digitalisées. Les images volumétriques ou voxels sont assez aisées à acquérir, et la déformation 3D est une transformation géométrique d'un volume donné V1 en un autre volume V2 (et sont donc applicables à la transformation du volume «crâne» vers le volume «visage»). Les procédés utilisés sont complexes, faisant appel soit à une déformation de maillages (ou mesh warping), à partir de grilles paramétriques ou de maillages triangulaires, soit à une déformation de champs (ou field warping), qui permet de travailler sur des points, des lignes, des disques (Chen *et al.*, 1996), ou des cubes (Lerios *et al.*, 1995), considérée comme plus précise. Dans l'ensemble ces méthodes sont le reflet informatique de la reconstruction faciale tridimensionnelle manuelle, fondée essentiellement sur les épaisseurs des parties molles en certains points anthropologiques. On retrouve donc probablement les mêmes problèmes, le résultat correspondant à un visage un peu standard. Une des limites importantes de la reconstruction 3D informatisée, est le manque de points anthropologiques comportant les épaisseurs moyennes de tissus mous (Caldwell, 1986; Rathbun, 1984).

Subsol *et al.* (1998) présentent une méthode générale de construction automatique d'atlas anatomiques à partir d'images médicales tridimensionnelles. L'originalité de la déformation 3D est d'utiliser ici la notion de «lignes de crête» sur le crâne et la face osseuse, qui sont mathématiquement des lignes de courbure absolue maximale. La déformation se fait par mise en correspondance de deux séries de lignes de crête, par un algorithme certes complexe, mais qui

fonctionne sur des itérations simples (distance euclidienne, transformations rigides, affines, polynomiales, splines, méthode des moindres carrés). Quatrehomme *et al.* (1997) adaptent ces principes à la reconstruction faciale tridimensionnelle informatisée, en passant d'un crâne de référence à un visage de référence, ce qui permet de calculer l'algorithme T, puis en appliquant cet algorithme de transformation T sur le crâne à reconstruire (sujet inconnu), pour obtenir le visage du disparu. L'intérêt de cette méthode est de s'affranchir totalement des épaisseurs cutanées moyennes, puisque l'algorithme est basé sur la mise en correspondance des lignes de crête d'un crâne à l'autre, puis l'application de l'algorithme sur le visage de référence, pour obtenir le visage inconnu (Subsol et Quatrehomme, 2005).

#### 4.6. Méthodes bidimensionnelles informatisées

Les difficultés de la reconstruction faciale tridimensionnelle manuelle ont été rapportées dans la littérature. On soulignera d'une part le temps nécessaire à une reconstruction manuelle, et d'autre part une certaine subjectivité, puisque nous ne connaissons les épaisseurs des parties molles qu'en certains points anthropologiques, que certains éléments ne pourront probablement jamais être déduits de la matrice osseuse, et qu'enfin certains éléments importants en pratique pour que les proches reconnaissent un visage (style des cheveux, barbe, lunettes, caractères chromatiques) ne sont en général pas connus au départ. Les méthodes informatisées tentent donc de répondre à ces problèmes, apportant la rapidité (Shahrom et coll. 1996), et réduisant la subjectivité. Les reconstructions faciales informatisées ont été mises au point sur des vues latérales (Walker 1984) ou frontales (Eisenfeld et coll. 1975) bidimensionnelles.

Actuellement certaines équipes travaillent sur des reconstructions informatisées tridimensionnelles, certainement beaucoup plus réalistes, et susceptibles d'une rotation à 360° (Claes et coll. 2006; Vandermeulen et coll. 2006). Assez curieusement, alors qu'une des critiques de la reconstruction faciale manuelle est d'être trop artistique et pas assez scientifique, la critique inverse pourrait être faite pour la reconstruction faciale informatisée, strictement scientifique et non artistique: or un simple contour, sans l'avoir «humanisé» n'est guère identifiable, car une simple silhouette est assez peu discriminante. D'autre part la reconstruction faciale informatisée nécessite un matériel puissant et des équipes informatiques de haut niveau, ce qui explique qu'assez peu d'équipes internationales travaillent scientifiquement sur ce sujet.

Un des grands avantages de ces techniques, outre la rapidité et l'absence de subjectivité, est l'introduction de niveaux incomparables d'adaptation, de flexibilité, d'efficacité: par exemple la possibilité de donner plusieurs résultats selon le statut pondéral, les caractères pileux, chromatiques, ou sociaux.

La reconstruction faciale informatisée peut être bidimensionnelle ou tridimensionnelle.

Les méthodes bidimensionnelles utilisent soit des procédés simples d'importation d'images, installés dans tous les microordinateurs, soit des logiciels de déformations d'images en deux dimensions. Evenhouse et coll. (1992) utilisent des algorithmes pour produire une face «moyenne» à partir de plusieurs photographies. Puis cette face standard est mise à l'échelle pour s'ajuster à un crâne marqué par des repères anthropologiques d'épaisseurs des tissus mous, et capturé par vidéo. Miyasaka et coll. (1995) créent un cadre et des contours faciaux, sur lesquels ils placent des composants faciaux, provenant d'une base de données de photographies de parties de visages. On voit donc dans ces méthodes qu'il s'agit plutôt d'une importation de composants d'un visage provenant d'une base de données, ou éventuellement d'une moyenne de plusieurs images photographiques. Ces systèmes informatiques sont évidemment capables de produire de nombreuses versions à partir d'un même crâne, mais on impose un jeu précis et spécifique de caractéristiques que l'on choisit, et ceci au détriment des informations scientifiques extraites de l'analyse anatomique, anthropologique, odontologique, et radiocéphalométrique du crâne. La sélection des caractéristiques ou des parties de photographies à partir de la base est par essence très subjective. De plus la reconstruction des zones situées entre les caractéristiques sélectionnées, habituellement par remplissage, ajout de contours et retouche d'images, amène également une subjectivité supplémentaire.

Les procédés de déformation d'images en deux dimensions, volontiers appelées *morphing* ou *warping*, qui permettent de passer du crâne bidimensionnel au visage bidimensionnel (Stephan et coll. 2005) sont en général précédés de la réalisation d'un visage de synthèse grâce à un logiciel de type portrait robot, puis le logiciel de déformation d'images agit dans un deuxième temps, enfin le logiciel de retouche d'images termine certains détails (Vignal 2000). L'image de synthèse de type portrait robot, est réalisée en plaçant les différents éléments composites (nez, yeux, lèvres, menton), en fonction de l'analyse préliminaire anthropologique et céphalométrique, dont nous avons déjà parlé. Le positionnement des différents éléments nobles du visage se fait donc scientifiquement (en



respectant la position horizontale et verticale des différents éléments), mais cette image n'est qu'une ébauche préliminaire.

Dans un deuxième temps, le crâne est numérisé en deux dimensions, de face, et les épaisseurs de tissus mous sont installées autour du crâne (avec une simple retouche d'image), en respectant les épaisseurs moyennes, tout en gardant la possibilité de varier d'un minimum à un maximum (avec un intervalle de confiance de 95%). On choisit cette épaisseur en fonction du sexe, de l'âge, et de la corpulence que l'on veut reproduire. On reste bien sûr dans les limites autorisées par l'intervalle de confiance, mais on peut modifier le contour en jouant entre le minimum et le maximum autorisé pour obtenir un ensemble équilibré.

Puis l'image du crâne numérisé, avec son contour de tissus mous, et l'ébauche «portrait robot» sont importées par le logiciel de déformation d'images. La déformation se fait du visage ébauche vers le crâne sec avec ses épaisseurs de tissus mous. Globalement la forme générale et l'équilibre de la face, les proportions, les positions respectives des éléments nobles, sont respectés par ce type de procédés (Vignal 2000). On peut ensuite ajouter les oreilles, la coiffure... avec le logiciel de type portrait robot, et donner plusieurs versions pour faciliter la reconnaissance par les proches. Certains succès sont incontestables, et certains cas médico-légaux ont permis la comparaison entre le visage réel et le visage reconstruit, montrant un résultat satisfaisant. Cependant nous manquons de validation scientifique en terme de ressemblance sur un nombre suffisant de cas contrôlés.

#### 4.7. Reconstruction faciale tridimensionnelle informatisée<sup>1</sup>

##### Introduction

De nos jours, la superposition faciale, c'est-à-dire la comparaison d'une photographie ou d'un modèle tridimensionnel d'un crâne avec la photographie d'une personne inconnue à des fins d'identification, fait couramment appel à des logiciels commerciaux (voir par exemple l'état de l'art dans Damas *et al.* (2010 – in press)). De même, la reconstruction faciale informatisée bidimensionnelle, c'est-à-dire à partir de photographies du crâne, intègre des logiciels d'infographie dans le cadre de protocoles pratiques bien établis [voir par exemple Vignal (1998)]. Par contre, l'utilisation de l'informatique pour la reconstruction faciale tridimensionnelle (3D) est peu répandue alors même

que le développement des systèmes de numérisation et la montée en puissance des capacités graphiques des ordinateurs permettent d'acquérir et de traiter des données 3D de plus en plus facilement et à des coûts raisonnables.

Les premiers travaux sur la reconstruction faciale 3D informatisée remontent à 1989 (Vanezis *et al.*, 1989). Depuis, de nombreuses méthodes ont été décrites et on pourra se référer en particulier à l'ouvrage de synthèse de Clement et Marks (2005), aux états de l'art de Wilkinson (2005), De Greef *et al.* (2005) ou Claes *et al.* (2010) ainsi qu'aux actes de la série des *International Conference on Reconstruction of Soft Facial Parts*.

Le nombre croissant d'articles montre tout l'intérêt de la communauté des médecins légistes pour la reconstruction faciale 3D informatisée alors qu'il y a très peu de publications en informatique. D'ailleurs, dans ce domaine, le terme «facial reconstruction» n'est utilisé que pour qualifier les algorithmes d'infographie qui modélisent en 3D un visage à partir de photographies. Pourtant, les recherches extrêmement actives en traitement et en synthèse 3D fournissent des algorithmes qui peuvent être directement utilisés pour les applications de reconstruction faciale comme nous allons le voir ci-dessous.

Après une brève description des systèmes de numérisation 3D du matériel médico-légal, nous nous proposons de décrire les différents algorithmes de reconstruction faciale 3D informatisée que nous répertorierons en quatre classes. Nous avons vu qu'il n'existe pas actuellement de logiciel de reconstruction faciale 3D utilisé couramment en médecine légale. Est-ce dû à un manque d'efficacité, quelles sont les améliorations à apporter? Nous tenterons d'analyser ce point dans une dernière partie.

##### Acquisition numérique 3D du matériel médico-légal

La première étape consiste à numériser le matériel médico-légal afin de pouvoir travailler sur une version numérique ou «virtuelle». Ceci peut se faire par l'intermédiaire de deux types de système d'acquisition 3D.

Les systèmes *surficiels* de numérisation 3D proviennent de la métrologie industrielle et sont fondés sur la triangulation laser, la projection de lumière structurée ou la photogrammétrie. Ils permettent d'obtenir très rapidement (en quelques secondes) et précisément (au moins au dixième de millimètre) les coordonnées d'un grand nombre de points sur la surface de la structure anatomique considérée. On peut donc numériser à des fins d'étude anthropologique (Weinberg and

<sup>1</sup> Chapitre rédigé par Gérard Sibsol et Gérald Quarechomme.

Kolar, 2005) des crânes secs, des masques mortuaires et même des visages de sujets vivants. À noter qu'il est possible d'obtenir en plus la couleur (codée suivant les trois composantes rouge, verte et bleue) des points numérisés, ce qui peut aider, en particulier, à définir des repères anthropométriques.

Les systèmes volumiques de numérisation 3D sont couramment utilisés en imagerie médicale clinique et permettent d'obtenir non-seulement des informations sur la surface mais aussi dans le volume même de la structure anatomique. La tomодensitométrie X est de plus en plus utilisée en médecine légale, en particulier pour les autopsies virtuelles (Leth, 2007) et il est maintenant tout à fait courant de scanner les structures crâniennes à des fins de reconstruction faciale 3D. L'imagerie par Résonance permet d'obtenir la surface 3D du visage ou de calculer des épaisseurs des tissus mous chez des patients vivants, même si la procédure d'acquisition reste longue et onéreuse. Par contre, on ne distingue pas les structures osseuses. L'échographie est un système léger et portable qui est donc tout indiqué pour faire des campagnes de mesures d'épaisseur de tissus mous, mais l'imagerie par ultrasons n'est pas assez précise pour obtenir la géométrie précise de structures anatomiques.

À noter que pour toutes ces modalités d'imagerie médicale volumique, on n'obtient pas directement la surface de la structure anatomique. Il est nécessaire d'appliquer préalablement un traitement informatique appelé «segmentation» (Rogowska, 2000) qui peut être assez complexe, en particulier dans le cas d'artefacts d'acquisition (créés, par exemple, par les prothèses métalliques dentaires dans les images tomодensitométriques).

Pour toutes les méthodes de reconstruction faciale 3D informatisée qui sont présentées ci-dessous, nous

supposerons que nous possédons au moins la numérisation 3D (surfactive ou volumique) du crâne inconnu. Pour certaines classes de méthode, il sera nécessaire d'avoir en plus d'autres numérisations 3D de crânes ou de têtes (c'est-à-dire du crâne et du visage du même sujet, alignés dans le même repère).

### Taxonomie des méthodes informatisées de reconstruction faciale 3D

Nous proposons de répartir les travaux existants en quatre classes (tableau 6.3). Cette classification se fonde sur les principes des algorithmes informatiques utilisés et sur les données 3D nécessaires.

#### Les méthodes morphologiques

Le principe consiste à informatiser la méthode de reconstruction faciale manuelle qui reconstitue l'anatomie de la face en localisant les muscles et les autres tissus mous sur le crâne puis en appliquant la couche cutanée (voir pp. 00 et suiv.).

Wilhelms et Van Gelder (1997) proposent des méthodes informatiques pour modéliser les structures anatomiques: les muscles sont représentés par des formes cylindriques qui s'accrochent sur la structure osseuse rigide et qui peuvent se déformer à volume constant; la peau est modélisée comme une surface composée de triangles dont les arêtes sont des ressorts afin de donner une élasticité du type d'une membrane. Ceci permet de modéliser des créatures virtuelles complètes et de créer des animations réalistes.

Kähler *et al.* (2003) reprennent ce type de modélisation, d'abord pour animer des visages à partir d'informations sur les contractions musculaires, puis pour construire un modèle complexe (incluant 24 muscles faciaux) à des fins de reconstruction faciale 3D. Pour cela, ils ajustent un modèle 3D muscle+peau sur le

Tableau 6.3: Classification des méthodes de reconstruction faciale 3D informatisée

Classe	Principe général	Données 3D nécessaires
Morphologique	Placement de structures anatomiques sur le crâne inconnu et modélisation biomécanique de la peau	✓ Crâne inconnu
Morphométrique	Repérage de certains points où l'épaisseur de tissu mou est connue et interpolation géométrique de la peau	✓ Crâne inconnu ✓ Épaisseurs des tissus mous
Déformation	Mise en correspondance d'une tête de référence avec le crâne inconnu et déformation volumique	✓ Crâne inconnu ✓ Tête (crâne + visage) de référence
Modélisation	Création d'un modèle de tête à partir d'une base de données et ajustement du modèle sur le crâne inconnu	✓ Crâne inconnu ✓ Base de données de têtes (crâne + visage)

crâne inconnu en localisant des points de repère. Ils utilisent certaines heuristiques fondées sur des mesures prises manuellement pour positionner des zones très variables comme le nez ou les lèvres. À noter qu'il est possible de paramétrer les expressions faciales du visage reconstruit, ce qui peut aider à l'identification. De même, on peut aussi utiliser des données morphométriques comme les épaisseurs de tissus mous pour tester différentes hypothèses de sexe, d'âge ou de corpulence. Quelques résultats sont présentés afin de comparer les reconstructions avec les vrais visages mais aucune analyse statistique n'est effectuée et aucune étude de cas concret n'est décrite.

Le calcul des interactions entre les tissus mous et l'os peut aussi être fondé sur la Méthode des Éléments Finis, largement utilisée en biomécanique. Par exemple Koch *et al.* (1996) construisent un modèle 3D de la tête qui intègre le crâne et la peau afin de simuler des opérations de chirurgie crânio-faciale.

L'informatisation de ces méthodes facilite la manipulation du matériel médico-légal, permet d'envisager et d'évaluer facilement plusieurs hypothèses différentes et d'échanger les résultats avec d'autres experts via Internet. Par contre, ces méthodes exigent toujours une grande expérience en anthropologie pour placer les structures anatomiques, retoucher éventuellement les insertions musculaires ou positionner les zones variables, ce qui fait que les résultats restent très dépendants de l'opérateur.

### Les méthodes morphométriques

Il s'agit de l'informatisation de la méthode manuelle qui se fonde sur les épaisseurs des tissus cutanés relevés en quelques points crâniométriques pour inférer la forme du visage (voir pp. 00 et suiv.).

Dans un premier temps, l'utilisateur sélectionne des points de repère crâniométriques 3D sur la surface du crâne virtuel à l'aide d'un programme dédié<sup>2</sup>. À noter que ces dernières années, de nombreuses recherches en informatique ont été menées pour essayer de détecter automatiquement les repères crâniométriques, que ce soit en appliquant des opérateurs mathématiques (Hartkens *et al.*, 2002; Subsol and Quatrehomme, 2005; Turner *et al.*, 2005), ou par corrélation avec les données d'un crâne de référence (Jones, 2001) ou en appliquant des gabarits prédéfinis (Cutting *et al.*, 1993).

Puis, l'opérateur va affecter à chaque point une épaisseur de tissus mous, ce qui permet de définir des points de repère qui seront à la surface du visage

à reconstruire. Il reste alors à faire passer la surface virtuelle du visage par ces nouveaux points.

Ce dernier problème n'est pas si simple d'un point de vue informatique. Une première idée est de décaler et déformer la surface du crâne pour qu'elle passe par les points du visage. Ceci peut être effectuée en interpolant l'épaisseur entre les points (Bullock, 1996; Plasencia, 1999), en dilatant la surface à l'aide d'une carte de distances (Bullock, 1996) ou en estimant des épaisseurs en tout point de la surface (Jones, 2001). Mais les résultats restent grossiers car la morphologie du crâne et du visage sont différentes, ne serait-ce que par la présence de trous.

Une deuxième possibilité est de modéliser la surface du visage à l'aide d'équations mathématiques et de calculer les paramètres afin qu'elle passe par les points de repère. Pour cela, Evenhouse *et al.* (1992) construisent un modèle composé de triangles qui s'appuie sur ces points, à partir duquel l'opérateur va ajuster des parties caractéristiques du visage comme le nez, les yeux ou la bouche. Andersson et Valfridson (2005) utilisent une surface cylindrique qui entoure le crâne et qui va venir se contracter sur les points de repère du visage. Archer *et al.* (1998) et Bullock (1996) décrivent un modèle beaucoup plus complexe fondé sur des fonctions mathématiques appelées Hierarchical B-splines et qui donne des résultats visuellement intéressants. Davy *et al.* (2005) choisissent une modélisation surfacique par des fonctions de type NURBS (Non-Uniform Rational Basis Splines) qui sont très utilisées en infographie.

Dans tous les cas, pour obtenir une bonne précision sur la surface du visage, il faut un grand nombre de paramètres. Or, ceux-ci ne peuvent être calculés que si on dispose d'un grand nombre de points de repère sur le visage. Comme les épaisseurs de tissus mous ne sont relevées qu'en un nombre très limité de points (quelques dizaines), cela implique de rajouter des points de repère manuellement, ce qui va rendre le résultat très dépendant de l'opérateur.

Une dernière solution consiste à déformer une surface de visage de référence par une transformation de l'espace. Par exemple, Vanezis *et al.* (2000) proposent d'utiliser des fonctions à base radiale 3D et un cas concret d'identification médico-légale est présenté.

L'informatisation des méthodes morphométriques facilite aussi grandement la manipulation du matériel médico-légal et permet d'obtenir rapidement plusieurs hypothèses de reconstruction faciale 3D en fonction des tables d'épaisseur de tissus mous. Mais ces dernières valeurs sont sujettes à discussion, que ce soit sur la précision des mesures ou l'utilité pour la recons-

<sup>2</sup> Comme par exemple le logiciel Landmark mis au point pour des applications de morphométrie 3D qui est téléchargeable à l'adresse : <http://www.idav.ucdavis.edu/research/EvoMorph>.



truction elle-même (Brown *et al.*, 2004; Starbuck and Ward, 2007).

Les épaisseurs de tissus mous ont d'abord été relevées manuellement sur des cadavres, puis à l'aide de radiographies ou d'échographies. Ainsi, De Greef *et al.* (2006) mesurent en 52 points les épaisseurs d'un échantillon homogène de 967 personnes. Plus récemment, on a proposé d'utiliser l'imagerie par Résonance Magnétique ou la tomodensitométrie X. Mais l'IRM ne permet pas de bien distinguer les structures osseuses et la tomodensitométrie implique des doses en rayons X qui sont incompatibles avec des mesures sur un grand échantillon de sujets sains. Cependant, l'utilisation de protocoles d'acquisition à basse dose (Prieels *et al.*, 2009) et surtout l'introduction récente du Cone Beam Computer Tomography (Fourie *et al.*, 2010) permettent d'obtenir des images 3D de la tête avec une exposition limitée au rayonnement. On peut donc envisager dans l'avenir de disposer de beaucoup de mesures d'épaisseurs de tissus mous en un grand nombre de points. Mais une difficulté majeure sera alors de localiser précisément, de manière fiable et objective, tous ces points 3D. C'est pour cela que nous pensons qu'il est important de développer les algorithmes de détection automatique de repères crâniométriques.

### Les méthodes par déformation

Dans cette classe de méthodes, le principe n'est pas comme précédemment de déformer la surface d'un visage de référence vers des points estimés du visage mais de calculer une déformation globale de l'espace qui va superposer un crâne de référence sur le crâne inconnu. Si nous disposons aussi du visage correspondant au crâne de référence, nous pouvons lui appliquer la déformation de l'espace pour obtenir une approximation du visage inconnu. Les premiers résultats obtenus par cette classe de méthode ont été décrits en 1997 (Quatrehomme *et al.*, 1997).

La première étape consiste donc à mettre en correspondance le crâne inconnu et le crâne de référence. Ceci peut être effectué en localisant et identifiant des repères crâniométriques manuellement ou automatiquement en utilisant les méthodes décrites dans le chapitre précédent. À noter le cas particulier présenté dans Mang *et al.* (2006) où les repères crâniométriques sont pris dans des images de modalités différentes : tomodensitométrie X pour le crâne inconnu et IRM pour la tête de référence.

Il est aussi possible d'utiliser des méthodes automatiques de « recalage non-rigide » des données 3D, qu'elles soient sous la forme d'une surface ou d'une image. De nombreux algorithmes ont été développés

depuis une vingtaine d'années pour des applications en imagerie médicale 3D que ce soit pour le suivi du patient au cours du temps ou la comparaison d'un cas pathologique avec un sujet sain. Dans le cas des surfaces 3D, on obtient les correspondances entre tous les points des deux surfaces et on trouvera un état de l'art complet dans Audette *et al.* (2000). Pour les images 3D, le résultat consiste en une correspondance entre tous les voxels<sup>3</sup> des deux images et on pourra se référer à Kybic et Unser (2005) pour une présentation des différents algorithmes.

Dans la deuxième étape, nous allons calculer une transformation de l'espace qui va superposer les éléments 3D (repères crâniométriques, points de la surface ou voxels) qui ont été mis en correspondance. Il s'agit d'un problème bien connu en synthèse d'images (Lerios *et al.*, 1995) qui présente deux difficultés : comment définir mathématiquement une fonction de déformation de l'espace qui va superposer très précisément un grand nombre d'éléments 3D et comment paramétrer sa régularité afin qu'on puisse supposer que la déformation de la surface du visage suive celle du crâne.

Plusieurs méthodes mathématiques ont été proposées et appliquées à la reconstruction faciale 3D avec des résultats intéressants. Par exemple, Nelson et Michael (1998) introduisent des « disc fields » pour définir la déformation autour de repères crâniométriques et ils montrent un résultat de reconstruction faciale 3D. Fang *et al.* (2000) comparent différentes fonctions d'interpolation fondée sur les distances aux repères et montrent leur intérêt pour calculer la déformation entre des crânes de primates et d'hommes ainsi que pour simuler la croissance du crâne d'un enfant. Attardi *et al.* (1999) appliquent le même genre de fonctions pour reconstruire le visage d'une momie. Wiley *et al.* (2005) modélisent la déformation de l'espace avec des fonctions du type Thin Plate Splines, très utilisées en morphométrie, ce qui leur permet de visualiser la transformation évolutive des crânes de plusieurs espèces de petits singes. Ce type de fonctions est aussi utilisé par Mang *et al.* (2006) mais peu de résultats sont présentés. Dans tous ces exemples, les correspondances 3D ont été déterminées manuellement ce qui rend les résultats dépendants de l'opérateur.

Subsol et Quatrehomme (2005) et Turner *et al.* (2005) extraient automatiquement, par des critères mathématiques fondés sur la géométrie locale, des repères 3D sous forme de lignes saillantes appelées

<sup>3</sup> Dans une image 3D, le voxel (contraction de « volumetric pixel ») est l'équivalent du pixel en 2D, c'est-à-dire le point élémentaire qui constitue l'image.

«lignes de crête». Ces lignes sont alors mises automatiquement en correspondance afin de calculer une déformation fondée sur les fonctions de type Thin Plate Splines. Vandermeulen *et al.* (2006) proposent d'utiliser des fonctions du type Free Form Deformation, très courante en infographie, pour calculer automatiquement la déformation qui va superposer au mieux les voxels des deux images 3D des crânes de référence et inconnu. La qualité de la superposition est estimée par une fonction mathématique, l'information mutuelle. Ketmi *et al.* (2008) utilisent aussi la même méthode mais évalue la superposition par l'erreur quadratique moyenne des intensités des voxels. Les auteurs proposent et analysent deux résultats de reconstruction faciale qu'ils jugent de qualité insuffisante.

Les avantages des méthodes par déformation sont multiples. D'abord, la déformation est globale et prend donc en compte toute la surface du crâne et du visage. D'autre part, nous n'avons plus besoin des épaisseurs de tissus mous qui sont difficiles à obtenir. Enfin, il est possible d'utiliser différentes têtes de référence en fonction des hypothèses sur le sexe, l'origine géographique ou la corpulence pour obtenir très rapidement, en particulier dans le cas où le processus est entièrement automatique, différentes hypothèses de reconstruction faciale.

Cependant, ces méthodes nécessitent d'avoir comme données, une tête, c'est-à-dire un visage et un crâne se correspondant et alignés dans le même repère. L'idéal est d'avoir l'image 3D d'un patient sain, acquise par tomographie X car dans cette modalité, il est très facile d'extraire les surfaces du crâne et du visage. Cependant, cela implique une forte dose de rayons X et de ce fait, l'acquisition n'est souvent autorisée que pour une indication clinique, c'est-à-dire dans le cas où une pathologie ou un traumatisme risque de distordre les surfaces du visage ou du crâne. Des recherches ont bien été menées pour extraire la surface du crâne dans des images IRM (Mang *et al.*, 2006; Rifa *et al.*, 2000) mais les résultats restent insuffisants pour le moment. De ce fait, on n'a disposé pendant longtemps que de données de tête très restreintes, ce qui limitait, voire biaisait les expériences de reconstruction faciale par les méthodes de déformation. D'autre part, le fait de déformer une tête particulière peut fausser l'identification car les détails non significatifs du visage de référence (par exemple, des rides ou des dermatoses) seront transposés sur le visage inconnu.

C'est pour pallier ce manque de significativité que des recherches sont activement menées pour constituer des bases de données et bâtir des modélisations statistiques du visage, du crâne et de leurs interactions qui seront utilisées dans les méthodes de la classe suivante.

À noter que les méthodes par déformation peuvent aussi être utilisées pour reconstruire d'autres structures anatomiques comme la main (Lefèvre *et al.*, 2007).

### Les méthodes par modélisation

Comme nous l'avons vu, la première difficulté est de rassembler un échantillon significatif pour modéliser une tête de référence. Récemment Tilotra *et al.* (2009) ont commencé à mettre en place une base de données de scanner X de têtes, dédiée aux applications de reconstruction faciale. Le but final est de sélectionner 160 sujets dont on connaît les caractéristiques (sexe, âge, poids, taille) ainsi que les traitements odontologiques et maxillo-faciaux. À noter que les différentes étapes de traitement de ces données – segmentation, choix et localisation de repères crâniométriques – ont été particulièrement étudiées pour qu'elles n'induisent pas de biais artéfactuel.

Tu *et al.* (2005) créent un modèle de tête qui consiste en une carte d'épaisseur des tissus mous en tout point du crâne. Pour cela, grâce à un algorithme de recalage non-rigide, ils déforment chaque crâne de la base de données d'image 3D obtenues par tomographie X sur un crâne de référence. Ces déformations sont ensuite appliquées au visage correspondant qui vient s'aligner sur le crâne de référence. Il est alors possible de calculer les épaisseurs de tissus mous pour obtenir une carte globale en tout point du crâne de référence. On peut ainsi appliquer une Analyse en Composantes Principales pour avoir une carte moyenne et ses modes de variations principaux. Ce modèle peut alors être adapté à un crâne inconnu pour approximer le visage en réglant manuellement l'amplitude des modes de variation. Pei *et al.* (2008) décrivent le même genre de méthode, même si les algorithmes utilisés sont différents et ils l'appliquent à partir d'une base de données de 102 images 3D.

Berar *et al.* (2006) construisent un modèle couplé du crâne et du visage. Pour cela, ils ajustent un modèle générique composé de deux surfaces, chacune d'environ 5 000 sommets, sur les données de 15 sujets extraits d'images acquises par tomographie X (TDM). Ils disposent donc de 15 couples de surfaces dont les points se correspondent et ils appliquent une Analyse en Composantes Principales afin de trouver un modèle moyen et les modes de variation principaux qui quantifient statistiquement la variabilité inter-sujets du crâne, du visage et de leur interaction. En ajustant le sous-modèle de crâne aux données du crâne inconnu, on calcule une déformation du sous-modèle de visage, ce qui permet de déduire une représentation du visage inconnu.

Claes *et al.* (2006) proposent de créer un modèle combiné du visage et de la profondeur des tissus mous. Pour cela, les visages de 118 personnes ont été numérisés avec un système stéréoscopique et l'épaisseur des tissus mous a été mesurée par échographie en 52 points. L'ensemble des points de la représentation 3D du visage ainsi que les 52 points estimés du crâne (déduits à partir du point du visage correspondant et de l'épaisseur) forment un modèle de tête. Les auteurs utilisent des algorithmes de recalage surfacique pour trouver automatiquement les correspondances entre les 118 modèles. Ils appliquent alors une Analyse en Composantes Principales pour construire un modèle statistique. Certains modes de variation sont corrélés à des critères morphologiques comme l'indice de masse corporelle ou le sexe. Dès lors, on peut ajuster les modes de variation du modèle pour qu'il s'adapte aux points crâniométriques relevés sur le crâne inconnu. On peut aussi rajouter des contraintes sur l'amplitude de ces modes en fonction de leur importance statistique ou de leur signification empirique. Une extension cette méthode, qui analyse en particulier l'influence des différentes données et du choix des représentations, est proposée dans Claes *et al.* (2010).

Paysan *et al.* (2009) combinent quatre modélisations. Tout d'abord, un modèle géométrique du crâne est obtenu à partir de surfaces extraites d'une base de données de 20 images tomographiques X. Pour cela, une surface générique est déformée vers les données, ce qui donne les correspondances entre les points. Une Analyse en Composantes Principales permet alors d'obtenir une surface moyenne et des modes de variation. Puis, un modèle géométrique du visage est construit par la même procédure à partir de numérisations surfaciques de 840 sujets. Dans un troisième temps, la relation entre les modèles du crâne et du visage est modélisée à l'aide d'une méthode d'apprentissage linéaire appliquée à une base de données de 23 images IRM où les surfaces du crâne et du visage ont été préalablement extraites à l'aide des modèles géométriques correspondants. Ceci permet de voir comment la décomposition en modes de variation du crâne se corrèle à celle du visage. Enfin, les attributs physiques (âge, sexe et poids) des 840 sujets sont corrélés au modèle du visage à l'aide d'une méthode d'apprentissage non-linéaire.

Lorsqu'on tente de reconstruire le visage inconnu, on minimise trois termes: l'écart par rapport à une interaction moyenne entre les modèles du crâne et du visage, l'écart par rapport à la relation moyenne entre le visage et les attributs estimés par des experts et la probabilité statistique de la géométrie du visage évaluée à partir des modes de variation. Les auteurs

montrent en particulier que l'introduction des attributs dans la modélisation améliore significativement les résultats.

Ces quatre méthodes sont très intéressantes car elles tentent de prendre en compte et de quantifier la variabilité humaine. Cependant, elles restent très complexes à mettre en place et peu de résultats concrets de reconstruction faciale sont présentés et évalués.

Dans tous les cas, une même difficulté apparaît: comment modéliser certaines zones faciales comme les yeux, le nez ou la bouche qui ne peuvent pas se caractériser par une simple épaisseur de tissus mous. En effet, il n'y a pas de tissus mous au niveau des yeux et le nez et la bouche sont des structures extrêmement variables en fonction de l'appartenance géographique<sup>4</sup>, du sexe, de l'âge ou de l'histoire de l'individu (fracture du nez ou édentation par exemple). Aussi, certains proposent de modéliser ces zones séparément du reste du visage. Alors que Tu *et al.* (2005) se restreignent à une édition manuelle à partir d'une collection de modèles 3D, Pei *et al.* (2008) construisent un modèle local de ces zones en utilisant l'Analyse en Composantes Principales. De même, Tilotta *et al.* (2010) mettent en place une représentation statistique locale de la forme du nez et du menton et les expériences à partir d'un apprentissage sur une base de données homogène de 47 sujets féminins donnent des résultats très encourageants.

Une limite de ces approches peut se trouver dans la méthode même d'analyse statistique. Ainsi, l'Analyse en Composantes Principales suppose que les données sont distribuées de manière gaussienne, que les variations des différents éléments sont corrélées linéairement et que les erreurs de mesure sont très faibles par rapport aux observations. Or, les deux premières hypothèses ne sont pas forcément vérifiées dans le cas des structures anatomiques, ce qui peut créer des modes de variation non significatifs. Des recherches sont d'ailleurs menées en statistique pour développer des méthodes se fondant sur des hypothèses plus faibles comme les méthodes d'Analyse en Composantes Principales non-linéaires.

Plus généralement, la modélisation 3D du visage et/ou du crâne humain et de leurs variabilités est un sujet qui a été étudié pour d'autres applications que la reconstruction faciale mais les algorithmes utilisés sont similaires. Dans le domaine de l'infographie, DeCarlo *et al.*, (1998) proposent un algorithme pour créer des modèles de visages de jeunes adultes nord-américains à partir des données disponibles dans Farkas (1994). Blanz et Vetter (1999) utilisent un modèle de la géométrie et de la couleur de visage construit à partir

<sup>4</sup> Anc. ethnio.



d'une Analyse en Composantes Principales de 200 visages numérisés de jeunes adultes pour synthétiser un modèle 3D à partir d'une simple photographie.

Afin de planifier des opérations complexes de chirurgie crânio-faciale, Dean *et al.* (1998) construisent des modèles 3D de crânes adaptés à l'appartenance géographique et au sexe du patient. La méthode est d'ailleurs généralisée pour la construction de modèles moyens du crâne et du visage dans Subramanyan et Dean (2000).

En paléanthropologie, Gunz *et al.* (2005) modélisent la forme du crâne à partir d'une base de données de plusieurs dizaines d'échantillons. Ceci permet d'étudier la variabilité normale du crâne actuel et, par là-même, de pouvoir mettre en valeur les différences morphologiques avec les crânes fossiles.

### **Le futur de la reconstruction faciale tridimensionnelle informatisée**

Malgré tous les travaux décrits ci-dessus, la reconstruction faciale tridimensionnelle informatisée ne semble pas être utilisée couramment. Seuls Wilkinson *et al.* (2006) décrivent une méthode assistée par ordinateur qui a été appliquée à de nombreuses reconstructions médico-légales ou historiques, dont on peut voir un échantillon dans Wilkinson (2010). Néanmoins, il s'agit d'une méthode qui reste très manuelle (elle s'appelle d'ailleurs «Virtual Sculpture») et où l'ordinateur intervient plus comme un support infographique interactif que comme un assistant offrant des fonctions 3D automatisées.

Nous pourrions donc penser que les performances ne sont pas à la hauteur des résultats obtenus manuellement. On trouve des comparaisons visuelles soit entre des méthodes de reconstructions faciales informatisée et manuelle soit entre une reconstruction faciale informatisée et le véritable «visage inconnu» (masque mortuaire ou visage d'un sujet vivant) dans nombre des références citées ci-dessus. Wilkinson *et al.* (2006) et Vanezis (2007) proposent de calculer des distances entre les surfaces de la reconstruction et du visage réel pour essayer de quantifier la ressemblance mais les valeurs ne sont pas forcément corrélées avec les résultats de la reconnaissance visuelle car des différences mineures de forme induisent une grande distance alors qu'elles ne modifient pas la physionomie générale.

En fait, on retrouve les mêmes problèmes que pour l'évaluation de la reconstruction faciale 3D manuelle, à savoir :

- la ressemblance n'implique pas forcément la reconnaissance ou l'identification (Stephan and Arthur, 2006);

- la précision de la reconstruction faciale ne dépend pas que de la méthode mais aussi des hypothèses sur la morphologie, le sexe ou l'appartenance géographique, voire l'état de santé (Wilkinson, 2010) de l'inconnu ainsi que de l'expertise de l'opérateur (Quatrehomme *et al.*, 2007);
- l'expression faciale doit être neutralisée afin de pouvoir comparer des visages qui ont la même attitude (Aeria *et al.*, 2010);
- enfin les éléments non-morphologiques (cheveux, pilosité, couleur de la peau et des yeux entre autres) jouent un rôle fondamental pour l'identification (Vanezis, 2007). Ce dernier point peut d'ailleurs être en partie informatisé par l'utilisation de logiciels de portrait-robot.

Sur la difficulté de reconnaissance 3D de visage, on pourra se référer aux états de l'art de Smeets *et al.* (2010) et Gökberk *et al.* (2009), qui ont été respectivement dressés dans le domaine de la médecine légale et de l'informatique.

En conclusion, nous pouvons affirmer qu'il n'est actuellement pas possible de savoir si les méthodes 3D informatisées surpassent ou non les méthodes 3D manuelles.

Par contre, il est clair que les méthodes automatiques sont plus rapides, à condition d'avoir la possibilité de numériser en 3D le matériel médico-légal et les données nécessaires. De ce fait, elles permettent de poser plus d'hypothèses et de les modifier plus facilement. Ce dernier point est fondamental pour l'identification médico-légale puisqu'il devient possible de faire varier la morphologie ou l'âge afin de proposer au public toute une palette de reconstructions faciales potentielles.

De surcroît, le fait d'obtenir un résultat en 3D permet de montrer le visage sous différents angles et de pouvoir le placer exactement dans les mêmes poses que des photographies ou des portraits. Nous sommes donc convaincus que la reconstruction faciale 3D informatisée sera de plus en plus utilisée dans les prochaines années.

Cependant, il faudra que les programmes ne soient plus des prototypes de recherche mais de véritables logiciels dédiés, avec une interface prévue pour des utilisateurs non-informaticiens. Les stations d'imagerie médicale 3D proposent déjà des outils très bien adaptés pour la communauté médicale mais il faudra peut-être proposer des périphériques 3D plus interactifs pour les phases de pointage de repères ou de retouche.

Wilkinson *et al.* (2006) montrent que les interfaces haptiques peuvent être intuitives à utiliser pour

manipuler des données 3D pendant la reconstruction faciale. Ce point est d'ailleurs confirmé par Buck *et al.* (2008) pour les applications médico-légales en général.

Enfin, il reste à améliorer les algorithmes pour que les médecins légistes puissent travailler avec des modèles plus précis, avec des bases de données plus importantes et en prenant mieux en compte toutes les connaissances anatomiques et anthropologiques.

Pour cela, il est important de suivre les développements d'une spécialité émergente de l'informatique qui s'appelle « Computational Anatomy » et qui a pour objectif de proposer des outils d'analyse quantitative de la forme des structures biologiques. Elle intègre en particulier le développement d'algorithmes performants d'extraction de repères 3D, de mise en correspondance non-rigide d'éléments 3D ou d'images 3D et de nouvelles méthodes d'analyse statistique. On pourra trouver dans Pennec et Joshi (2008) des exemples des recherches récentes sur le sujet.

Un autre axe de recherche à développer est certainement la possibilité de travailler sur du matériel incomplet. Le problème est très fréquent en paléontologie où les crânes fossiles sont souvent déformés ou fragmentés, voire avec des grandes parties manquantes.

Certains paléoanthropologues comme Gunz *et al.* (2009), proposent déjà des outils informatiques pour essayer de reconstruire un crâne complet à des buts d'analyse morphométrique et cette méthodologie peut être utilisée pour la reconstruction faciale 3D informatisée comme le montre par exemple le cas traité dans Benazzi *et al.* (2009).

Voyons ainsi dans la section suivante les progrès en ces domaines et l'intérêt de ces techniques de reconstitution en anatomie musculo-squelettique en général.

### Médecine légale et infographie<sup>5</sup>

Les techniques de modélisation par infographie ont montré des progrès importants au cours de la dernière décennie. Pourtant la médecine légale n'a pas encore vraiment encore profité des ces nouvelles avancées technologiques. Quelques exemples sont repris dans cette section. Ils associent une connaissance détaillée et quantitative de l'anatomie, le développement des outils mathématiques nécessaires et la création d'une interface logicielle permettant à un opérateur de répondre à la question médico-légale posée. Un tel développement doit nécessairement se faire en étroite collaboration avec des experts en médecine légale afin de répondre au mieux aux exigences de terrain.

<sup>5</sup> Section rédigée par Serge Van Sint Jan, Laboratoire d'Anatomie, Biomécanique et Organogénèse, Faculté de Médecine – Université Libre de Bruxelles. Website: [homepages.ulb.ac.be/~labo](http://homepages.ulb.ac.be/~labo).

### Reconstitution de caractères morphologiques d'un segment osseux

Des techniques de régression mathématiques couplées à l'utilisation de la manipulation de reconstruction tridimensionnelle (3D) obtenue par imagerie médicale peuvent aider à l'interpolation de paramètres morphologiques typant un os partiellement retrouvé.

Imaginons par exemple, un fragment de scapula trouvé sur une « scène de crime ». Ce fragment est nettoyé et analysé par imagerie médicale pour ensuite obtenir un modèle 3D (Figure 1A) à partir de techniques de reconstruction 3D (Van Sint Jan, 2005a). Un certain nombre de points remarquables observables à la surface du modèle 3D (Van Sint Jan *et al.*, 2007) sont ensuite sélectionnés par l'opérateur; ces points correspondent à des points de repères anatomiques (par exemple, l'angle supérieur de la scapula) (Figure 1B). Une base de données permet ensuite d'établir la relation entre ces points remarquables et d'autres caractéristiques morphologiques, manquantes celles-ci (par exemple, la position et le rayon de courbure de la cavité glénoïdale, représentée par une sphère à la Figure 1C). Finalement, la totalité de l'os peut être reconstruite et des paramètres supplémentaires mesurés (Figure 1D, où la longueur entre l'angle inférieur et l'angle de l'acromion est mesurée). Cette méthode fait appel à des méthodes de régressions multidimen-

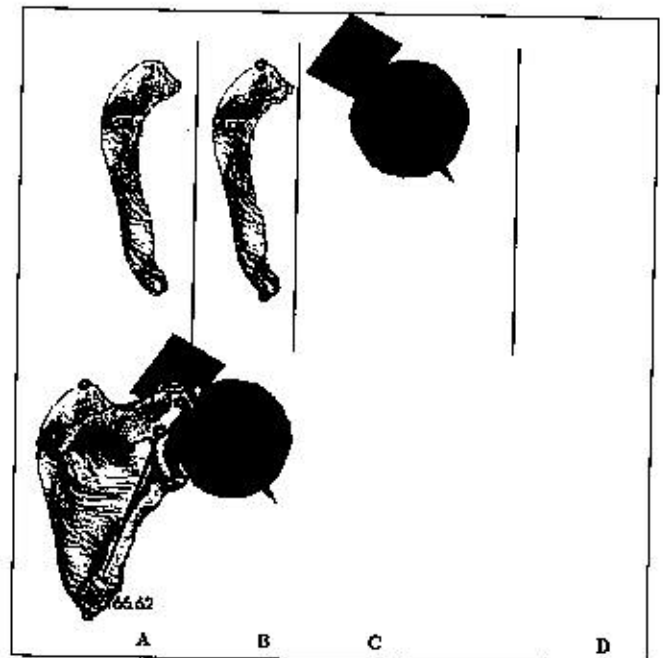


Fig. 6.5. Reconstitution d'un os par régression multidimensionnelle et infographie. Voir texte pour explications.

sionnelles (Sholukha *et al.*, in press; Sholukha *et al.*, 2009).

Notons que ce genre de régression nécessite la disponibilité de bases de données soigneusement élaborées pour la description des relations (géométriques ou autres) des caractères morphologiques d'intérêt (dans le cas de notre exemple, la relation spatiale entre les points indiqués dans la Figure 1B et les structures anatomiques interpolées visibles à la Figure 1C). La qualité des prédictions réalisées par ces régressions est proportionnelle au nombre d'instances (dans notre exemple, une instance représente un os dont les caractéristiques sont connues et qui sert de base de référence en association avec les autres instances trouvées au sein de la base de données).

#### Modélisation par éléments finis pour la prédiction de fractures osseuses lors d'impacts

La compréhension de l'apparition de fractures osseuses lors d'impacts (accidents de voiture, chutes, etc.) reste difficile et ce, en raison du manque de données relatives à l'impact même. La simulation par infographie peut apporter des éléments de réponse. Comme dans le cas de la technique précédente, cette technique fait appel à l'imagerie médicale pour la reconstruction 3D des modèles osseux nécessaires. Dans le cadre de la méthode des éléments finis, une information relative à la résistance des matériaux en présence (os spongieux, os compact, etc.) est rajoutée à l'information purement géométrique du modèle (Viceconti *et al.*, 2008). Le modèle est ensuite soumis à certaines conditions décrivant des conditions physiques particulières (par exemple, un membre inférieur « assis » dans un siège de voiture au moment d'un accident frontal).

La qualité des modèles en éléments finis dépend fortement de la justesse de l'information anatomique utilisée, en terme de géométrie et de caractérisation des matériaux. En effet, la qualité de l'os est fortement variable individuellement, mais aussi au cours du vieillissement de l'individu. Un des défis actuels dans ce domaine est la création de bases de données représentatives des deux sexes et des différentes catégories d'âges impliqués (enfants, adolescents, jeunes adultes, vieillards, etc.). Quoiqu'il en soit, de telles techniques semblent intéressantes dans le cadre de perspectives médico-légales et accidentologiques.

#### Modélisation du système musculo-squelettique

L'expertise légale en matière d'assurance ou de médecine du travail requiert parfois l'utilisation de l'analyse de mouvements pour déterminer si un individu est en capacité de travail ou non. Une telle analyse se base sur le déplacement des segments corporels du sujet pour quantifier les amplitudes articulaires des segments considérés. Faisant une comparaison avec des données de références, l'analyste peut dès lors déterminer si l'amplitude articulaire quantifiée est compatible ou non avec les activités professionnelles de sujet. Outre l'amplitude de mouvements, des paramètres supplémentaires tels que la vitesse du mouvement ou la présence ou non de mouvements combinés sont aussi mesurables (Van Sint Jan *et al.*, 1998). Notons que ces paramètres supplémentaires sont beaucoup plus fiables dans un contexte médico-légal qu'une simple amplitude articulaire, et certainement dans le cas où l'individu analysé est suspecté de simuler une incapacité de travail.

Il est possible aujourd'hui d'ajouter des informations liées à la fonction musculaire, par exemple les bras de levier et les longueurs des muscles. Ceci rend

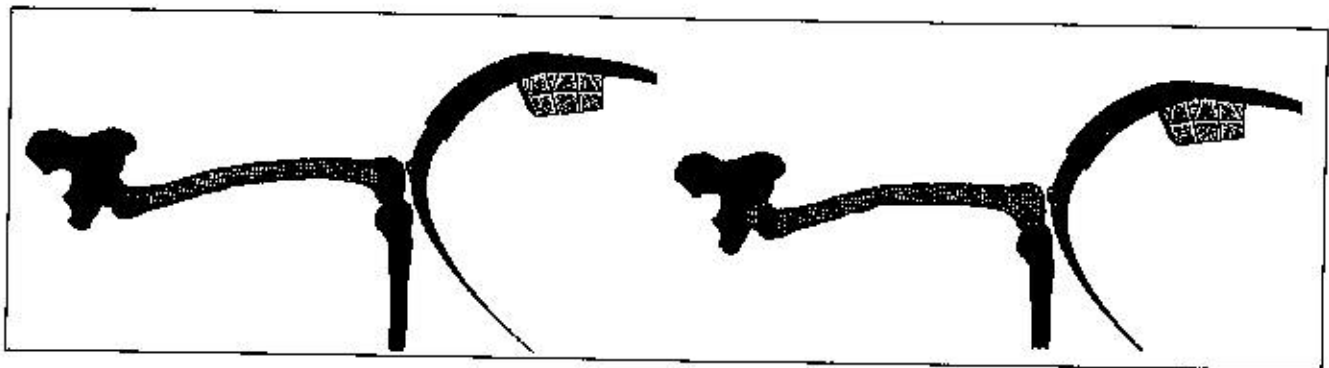


Fig. 6.5. Modèle de membre inférieur en éléments finis mis dans une position similaire à celle adoptée par le squelette quand un individu est assis derrière un tableau de bord (représenté par l'objet de forme elliptique à droite de l'image). Le but de l'étude illustrée ici fut de déterminer l'influence de la forme du tableau de bord sur le moment d'apparition de la fracture et la localisation de cette dernière. À gauche, le modèle est mis sous contrainte lors d'un impact avec le tableau de bord. Les zones de hautes contraintes sont visibles au niveau de la diaphyse fémorale. À droite : le modèle prédit une fracture localisée au milieu de la diaphyse fémorale. (résultats obtenus au cours du projet VAKHUM (Van Sint Jan, 2005b), image par courtoisie de la société ESI Group, [www.esi-group.com](http://www.esi-group.com)).



possible de quantifier non seulement le potentiel articulaire de l'individu analysé, mais également d'analyser le recrutement musculaire ou d'autres paramètres physiologiques liés à l'activité physique (locomotion, activités professionnelles, etc.).

Une telle modélisation fait appel à la fusion de données. Cette méthode de fusion permet la combinaison contrôlée de données hétérogènes telles que par exemple la modélisation 3D obtenue à partir de l'imagerie médicale, l'analyse de mouvements et l'électromyographie. Une interface utilisateur, et un environnement permettant la visualisation des données et la production de rapports aboutissent à une analyse complète des données disponibles (Figure 3).

### Conclusions

Les exemples sus-jacents ne sont que quelques idées de développement possibles. D'autres applications sont sans doute possibles mais nécessitent une communication entre les représentants des différentes expertises requises (médecine légale, anatomie, infographie, mathématique, etc.). Une validation stricte des résultats est également requise avant d'utiliser quotidiennement ces méthodes. Notons que le genre d'outils décrits dans cette section permet une quan-

tification stricte et validée des différentes mesures effectuées. Une communication multidisciplinaire est requise si l'on désire que ces techniques voient le jour et puissent compléter la panoplie d'outils déjà à la disposition des investigateurs de terrain.

## 5. La comparaison d'images

La comparaison d'images est de plus en plus utilisée, du fait de la multiplication de caméras vidéo dans les lieux publics ou sensibles, du fait aussi de l'enregistrement fréquent et fortuit de certaines scènes par des vidéo amateurs. Les documents photographiques sont également très nombreux. Le problème est donc de comparer la photographie ou vidéo prise sur les lieux d'un délit ou d'un crime, avec la photographie d'un suspect, ou le suspect lui-même.

Il s'agit d'un problème réellement anthropologique, car cette comparaison ne peut se faire que par des scientifiques formés aux variations anatomiques et biologiques humaines, en particulier faciales, aussi bien qualitativement que quantitativement, à la fois statiques et dynamiques (vieillesse, mimiques, génétique). On peut considérer que ces comparaisons sont scientifiquement

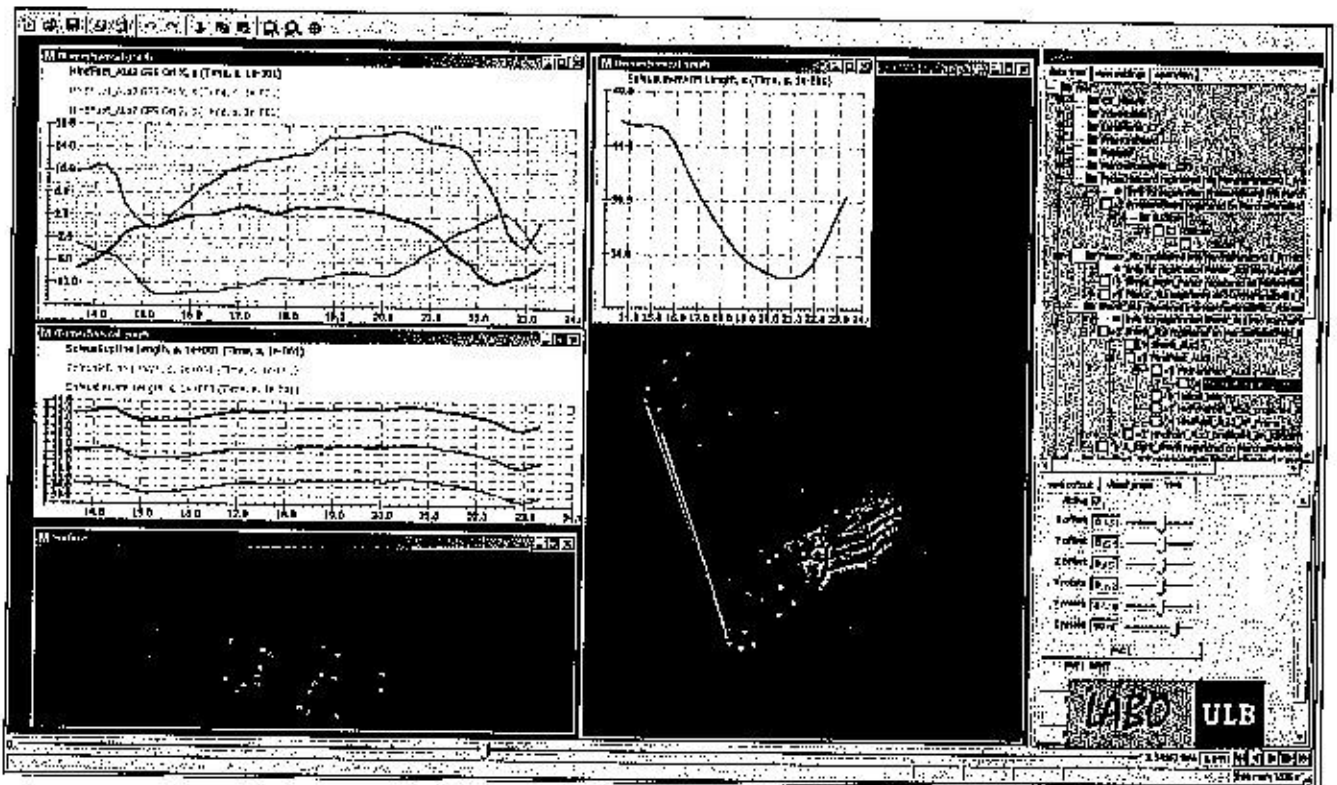


Fig. 6.5. Logiciel de fusion de données. Un tel logiciel permet de gérer les données grâce à une structure hiérarchisée (visible à droite de l'image). Le modèle anatomique visible ici a été obtenu après la fusion de données en provenance de l'imagerie médicale, de l'analyse de mouvements, de l'électromyographie et de l'analyse des pressions plantaires.

très difficiles, et posent comme précédemment des problèmes techniques et la validation de critères qualitatifs et quantitatifs de prise de décision.

### 5.1. Problèmes techniques

Les problèmes déjà soulevés pour la superposition faciale se posent dans les mêmes conditions: distance, orientation, déformation éventuelle, profondeur de champ, sont des éléments techniques importants à prendre en considération. C'est la raison pour laquelle la comparaison métrique de deux photographies amenées par les enquêteurs est très délicate ou impossible, dans la mesure où les deux photographies ne sont jamais prises dans les mêmes conditions, notamment de distance et d'orientation, et ne permettent pas la comparaison.

Il est préférable que l'expert dispose des originaux, et pas seulement d'éventuels agrandissements fournis par les services de Police, car il peut y avoir déformation de l'image, et il vaut mieux le savoir avant de tenter une comparaison. İşcan et Loth (2000) soulignent qu'ils ont effectué certaines comparaisons où le document original montrait des lumières de spots arrondies, alors qu'elles étaient ovalaires sur le document agrandi; il y avait donc une déformation de ces lumières, et en conséquence une déformation des caractéristiques du visage, ce qui altère les possibilités de comparaison.

Il existe d'autres difficultés: les enregistrements vidéo sont souvent de médiocre qualité; la caméra ne permet pas toujours d'obtenir un angle intéressant du suspect pendant l'enregistrement; la lumière n'est pas toujours adéquate. Occasionnellement la photographie fournie par la famille du suspect a pu être retouchée: ceci est de plus en plus fréquent avec le développement de la photographie numérique. Plus simplement le maquillage peut masquer ou altérer des éléments importants comme des cicatrices, ou rajeunir un sujet de sexe féminin.

### 5.2. Méthode qualitative

Appelée également technique morphologique, les objectifs sont de retrouver certaines caractéristiques qualitatives qui sortent de l'ordinaire et qui vont faciliter la comparaison. En effet certaines caractéristiques générales répandues dans une population locale ne sont pas discriminantes, alors qu'elles pourraient l'être dans un autre gisement de population. Globalement le crâne et le visage ont été décrits et classés de façon précise. Ces descriptions et classifications concernent à la fois la forme générale du crâne et du visage, puis de parties du visage. Par exemple la forme générale du visage de face peut être classée en ronde, ovale, ellip-

tique, pentagonale, rhomboïde, carrée, trapézoïde, asymétrique..., et le profil peut être vertical, concave, ou en projection haute (front), moyenne (nez), ou basse (menton) (İşcan, 1993). Ensuite chaque élément du visage est analysé et classé: front, yeux, nez, bouche et lèvres, menton, oreilles. D'autres éléments comme la couleur de la peau, les rides, la pilosité, les caractères chromatiques, les attributs sociaux (lunettes...) seront discutés. Ces descriptions sont assez fines et complexes, chaque caractère pouvant contenir 5 ou 6 items de description. Mais globalement les descriptions sont fondées sur la dimension, la forme, la couleur, la présence ou l'absence d'un élément.

Il est préférable choisir des sites qui vont résister le mieux au vieillissement, au statut pondéral, et au maquillage; cependant le choix doit aussi être dicté par le caractère bien visible ou clair dans une image photographique (par exemple les oreilles sont souvent cachées par les cheveux chez les femmes). Certaines expériences neuropsychologiques montrent que les caractères quantitatifs (comme la hauteur totale du visage, du front, ou la largeur du visage) appréciés qualitativement (sous la forme d'un adjectif qualificatif) sont de très mauvais évaluateurs, contrairement aux caractères purement qualitatifs comme la description de la forme générale du visage, du nez ou des oreilles.

### 5.3. Méthodes quantitatives

Cette approche anthropométrique semble plus objective, puisqu'elle mesure des distances entre deux points anthropologiques et calcule des indices (rapports de deux distances). Cependant une limite immédiate vient à l'esprit: on ne travaille pas ici sur un sujet 3D (anthropométrie), mais sur une photographie 2D (photoanthropométrie), et on retrouve les problèmes déjà soulignés de repérage précis de certains points anthropologiques sur la photographie, mais aussi de distance, orientation, déformation, profondeur de champ. La qualité du document photographique fourni à l'expert joue évidemment un grand rôle dans les possibilités de travail.

Les photographies doivent être élargies idéalement en 1/1, mais à condition que cela n'altère pas la qualité, et surtout que cela ne déforme pas, car toute comparaison devient alors impossible (İşcan et Helmer, 1993). Les points utilisés sont les points classiques sur une face ou un profil standard: front (trichion, métopion, glabelle), joues (zygion), nez (nasion, midnasal, pronasal, sous-nasal, alaire), yeux (endocanthion, ectocanthion), bouche (labial supérieur, stomion, labial inférieur, cheilion), menton (pogonion, gnathion, menton), oreille (sus-auriculaire, sous-auriculaire,

post-auriculaire, tragion). D'autres points sont utilisables s'ils sont clairement définis sur les deux photographies à comparer, d'autant plus qu'en général on ne dispose pas d'une face ou d'un profil standard, mais d'un trois-quarts. Les mesures sont effectuées à l'aide d'un pied à coulisse.

D'une façon générale, il est préférable de travailler sur des indices plutôt que sur des distances, car on élimine ainsi le problème de l'agrandissement, comme nous l'avons vu plus haut. Même si on peut utiliser des objets présents sur la photographie pour calculer l'agrandissement, cela est souvent très difficile à contrôler. En effet les droites sont altérées par l'orientation de la photographie (une droite se projette en une droite de taille identique ou différente selon l'orientation ; et une courbe se projette en une ligne de taille et forme variables), et la profondeur de champ limite la possibilité d'utilisation de ces repères. De nombreux indices peuvent être générés pour permettre la comparaison. L'intérêt est que les probabilités pour chaque indice vont se multiplier (et non s'ajouter) si bien qu'avec une quinzaine d'indices on obtient une probabilité déjà très importante. La photanthropométrie peut théoriquement s'appliquer aussi bien à la comparaison de deux photographies fournies par les enquêteurs, d'une photographie avec l'enregistrement vidéo, ou une photographie (ou vidéo) avec le suspect lui-même. Dans tous les cas où on ne dispose pas du suspect lui-même, les comparaisons métriques sont considérées comme très difficiles, dans la mesure où l'orientation et la distance ne peuvent en aucun cas être contrôlées ni modifiées.

Si on dispose physiquement du suspect, cette difficulté est théoriquement surmontée. On peut alors mesurer non seulement des distances crâniennes ou faciales, mais également d'autres distances comme la hauteur des épaules par rapport au sol, ou encore des éléments comme les oreilles et les mains. L'identification par comparaison morphologique et morphométrique de l'oreille et de l'iris subit un regain d'intérêt depuis quelques années. Cependant la comparaison d'une image photographique ou vidéo (souvent de piètre qualité), avec le suspect, pose un problème particulier puisqu'on compare une image 2D avec un volume 3D. Yoshino (2005a, b) développe un système d'acquisition de la morphologie faciale du suspect en 3D, puis un système de superposition de ce volume 3D avec une image 2D. Il obtient de bons résultats dans cette comparaison, et souhaiterait dans l'avenir automatiser complètement ce processus. Lynnerup (2005, 2006) utilise plusieurs stratégies d'identification dans ces circonstances : identification faciale qualitative et quantitative ; identification corporelle qualitative et quantitative (notamment en référence aux mesures

quantitatives de l'environnement) ; et analyse de l'habitus (par des études du mouvement corporel des membres, angles articulaires...). Les analyses quantitatives sont effectuées par triangulation entre plusieurs enregistrements du suspect avec différents angles, et permettent des mesures corporelles précises.

Cependant, il ne faut pas oublier que le criminel tente généralement de modifier son aspect, son habitus... lors de la commission de l'infraction comme lors de l'expertise. Les caractères pileux et chromatiques sont de très mauvais indicateurs de comparaison, puisqu'ils peuvent être aisément modifiés. Le criminel est souvent déguisé, et seule une partie de son visage est éventuellement visible. Il faut tenir compte aussi de ses chaussures, qui modifient sa stature, et la hauteur entre le sol et les épaules, mais plus prosaïquement la simple modification de son habitus peut la modifier. C'est la raison pour laquelle, quand on met le suspect en situation pour effectuer la comparaison, il faut enregistrer l'ensemble du processus de comparaison par vidéo, afin de dépister des tentatives de fraude de la part du sujet (Helmer *et al.*, 1997).

Au total, ces importantes difficultés démontrent qu'il est nécessaire de développer des méthodes scientifiques de comparaison dans ce domaine, tout en sachant que chaque cas présenté est unique, encore plus sans doute que dans la superposition faciale. Ce type de comparaison nécessite une grande compréhension des variations purement anatomiques de la face, mais aussi des variations dynamiques dans le temps (croissance, âge, statut pondéral, mimiques, changements de style de coiffure, barbe, grisonnement des cheveux, exposition au soleil, pathologies) (İşcan et Helmer, 1993). Ces importantes modifications dynamiques posent de grands problèmes quand on compare des images photographiques séparées par plusieurs années. Ce type d'expertise peut être demandé lors des crimes imprescriptibles, comme les crimes contre l'humanité, ou quand la législation prévoit des délais de prescription longs, comme aux États-Unis. L'âge accentue ou crée des rides, modifie la quantité et qualité des cheveux ; mais des modifications plus profondes peuvent survenir comme l'allongement du nez, l'élargissement des oreilles (İşcan et Helmer, 1993), ou l'allongement du lobe de l'oreille.

## 6. Le vieillissement du visage d'un enfant disparu

La croissance modifie évidemment le visage, mais la forme générale de divers éléments faciaux se modifie finalement assez peu à travers le temps (İşcan et



Helmer, 1993). Une excellente compréhension de la croissance crânienne et faciale de l'enfance à l'adolescence, puis à l'âge adulte, est évidemment indispensable. L'image faciale peut être construite en utilisant divers composants provenant d'une base de données. De nombreuses versions sont facilement produites par ordinateur. Le résultat ressemble à un dessin, mais des logiciels plus modernes sont capables de «vieillir» en trois dimensions, en travaillant à la fois sur les connaissances scientifiques des modifications progressives, d'année en année, d'un visage d'enfant, mais aussi sur les caractéristiques génétiques, à partir des traits des visages des deux parents. La critique essentielle est que l'on s'intéresse peu aux caractéristiques anthropologiques du crâne à identifier, donc il existe de nombreuses interprétations, et le caractère scientifique de cette méthode n'est pas actuellement validé.

## 7. Conclusions

Nous avons envisagé dans ce chapitre plusieurs méthodes d'identification reconstructive crânio-faciale, en apparence disparates, mais qui ont en commun une connaissance précise des éléments de variation anatomiques, physiologiques et éventuellement pathologiques, du crâne et du visage humain. Ces variations sont également dynamiques (vieillesse, mimique). Toutes ces techniques sont difficiles et réservées à des laboratoires spécialisés. En effet l'épaisseur des tissus mous en certains points anthropologiques ne résume aucunement les problèmes et les difficultés de ces méthodes, car le plus important est sans doute la relation et l'équilibre entre les parties nobles du visage. De plus le visage montre des variations subtiles, qui en font toute la personnalité. Il est impossible que tous les points cutanés soient déterminés ou estimés correctement par les points osseux anthropologiques. D'autre part les phénomènes neuropsychologiques qui permettent la reconnaissance d'un visage sont extrêmement complexes, et les avancées scientifiques dans ce domaine seront certainement une aide précieuse pour favoriser la reconnaissance d'un visage par les proches dans l'avenir.

Par ailleurs la restitution des résultats joue un rôle non négligeable pour espérer une meilleure performance. Le passage du tridimensionnel au bidimensionnel (passage obligatoire quand les reconstructions sont publiées dans les médias) fait perdre des informations, et sans doute perdre des possibilités de reconnaissance par les proches, car le résultat est nettement moins réaliste. On peut se demander s'il faut rendre le résultat de face, de profil, ou de trois quarts avant? La

neuropsychologie semble indiquer que la reconnaissance d'un visage est plus difficile de profil ou trois-quarts; cependant l'orientation de trois-quarts atténue d'éventuelles erreurs, comme le massif nasal, qui pourraient gêner la reconnaissance si les erreurs sont importantes. Une autre question est de savoir s'il faut donner un résultat brut (plâtre ou résine) qui donne une apparence fantomatique (Aulsebrook, 2000), ou plus élaboré (peint, maquillé...). Les attributs aléatoires (cheveux et poils, caractères chromatiques, caractères sociaux), ne doivent pas a priori être ajoutés au début mais uniquement quand on obtient des propositions d'identité; cependant l'expérience montre combien ces caractères aléatoires sont ceux qui frappent le plus les témoins quand on effectue des expériences neuropsychologiques de reconnaissance de visages. Le statut pondéral joue également un rôle important dans la reconnaissance d'un visage, mais il est habituellement inconnu au stade de l'identification reconstructive.

Enfin il faut souligner que nous manquons cruellement de validations scientifiques dans tous ces domaines: seule la superposition faciale a fait l'objet de travaux scientifiques suffisamment élaborés. Les succès isolés publiés après reconstruction faciale ne préjugent pas de l'origine du succès (ressemblance, opportunité, hasard...), et la recherche scientifique doit impérativement se poursuivre dans ce domaine (Stephan, 2002; Stephan *et al.*, 2003; De Greef et Willems, 2005).

### Pour en savoir plus

- Aeria G, Clacs P, Vandermeulen D, and Clement JG (2010) Targeting specific facial variation for different identification tasks. *Forensic Sci Int* 201: 118-24.
- Andersson B, and Valfridsson M (2005) Digital 3D Facial Reconstruction Based on Computed Tomography. Master's thesis, Linköpings Universitet, Suède.
- Archer K, Coughlan K, Forsey DR, and Struben S (1998) Software Tools for Craniofacial Growth & Reconstruction. Graphics Interface, Vancouver (Canada): Canadian Human-Computer Communications Society, pp. 73-81.
- Attardi G, Betrò M, Forte M, Gori R, Guidazzoli A, Imboden S, and Mallegni F (1999) 3D facial reconstruction and visualization of ancient Egyptian mummies using spiral CT data - soft tissues reconstruction and textures application. International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH, sketches and applications, Los Angeles (U.S.A.).
- Audette MA, Ferris FP, and Perers TM (2000) An algorithmic overview of surface registration techniques for medical imaging. *Med Image Anal* 4: 201-17.

- Aulsebrook WA (2000) Facial tissue thickness in facial reconstruction. *Encyclopedia of Forensic Sciences*. JA Siegel, PJ Saukko, GC Knupfer (eds.). Academic Press, San Diego, pp. 779-788.
- Aulsebrook WA, İşcan MY, Slabbert JH, Becker P (1995) Superimposition and reconstruction in forensic facial identification: a survey. *Forensic Sci Int*, 75, 2-3, 101-120.
- Austin-Smith D, Maples WR (1994) The reliability of skull/photograph superimposition in individual identification. *J Forensic Sci*, 39, 2, 446-55.
- Basauri C (1967) A body identified by forensic odontology and superimposed photographs. *Int Criminol Pol Rev*, 204, 37-43.
- Beier T, Neely S (1992) Feature-based image metamorphosis. *Proc. SIGGRAPH 92*. In: *Computer Graphics*, 26, 2, 35-42.
- Benazzi S, Stansfield E, Milani C, and Gruppioni G (2009) Geometric morphometric methods for three-dimensional virtual reconstruction of a fragmented cranium: the case of Angelo Poliziano. *Int J Legal Med* 123: 333-44.
- Berar M, Desvignes M, Bailly G, and Payan Y (2006) 3D Semi-Landmarks Based Statistical Face Reconstruction. *Journal of Computing and Information Technology* 14: 31-43.
- Blanz V, and Vetter T (1999) A Morphable Model for the Synthesis of 3D Faces. *Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 187-194.
- Broadbent TR, Matthews VL (1957) Artistic relationships in surface anatomy of the face: application to reconstructive surgery. *Plastic and Reconstructive Surgery*, 20, 1, 1-17.
- Brown RE, Kelliher TP, Tu PH, Turner WD, Taister MA, and Miller KWP (2004) A Survey of Tissue-Depth Landmarks for Facial Approximation. *Forensic Science Communications* 6.
- Bruyer R (1990) *Les Mécanismes de Reconnaissance des Visages. Un Bilan provisoire des Modèles Théoriques*. Presses Universitaires de Grenoble.
- Bruyer R, Dussart T (1985) Lateral differences in the race effect in face recognition. *International J of Neuroscience*, 28, 61-72.
- Buck U, Naether S, Braun M, and Thali M (2008) Haptics in forensics: the possibilities and advantages in using the haptic device for reconstruction approaches in forensic science. *Forensic Sci Int* 180: 86-92.
- Bullock DW (1996) *Computer Assisted 3D Facial Reconstruction*. Master's Thesis, University of British Columbia, Canada.
- Burstone CJ (1958) Integumental contour and extension patterns. *Angle Orthodontics*, 29, 93-104.
- Burstone CJ (1967) Lip posture and its significance in treatment planning. *Am J Orthodontics*, 53, 4, 262-284.
- Caldwell MC (1981) *The relationship of the details of the human face to the skull and its application in forensic anthropology*. Master's Thesis, Arizona State University, Tempe, AZ.
- Caldwell MC (1986) *New questions (and some answers) on the facial reproduction techniques*. In: KJ Reichs (ed.) *Forensic osteology: advances in the identification of human remains*. Springfield, Ill. Charles C Thomas, pp. 229-255.
- Chandra Sekharan P (1971) A revised superimposition technique for identification of the individual from the skull and photograph. *J Criminal Law Criminol and Police Sci*, 62, 1, 107-113.
- Chandra Sekharan P (1993) Positioning the skull for superimposition. In: MY İşcan, RP Helmer (eds.), *Forensic analysis of the skull*, Wiley-Liss, New York, pp. 105-118.
- Chen M, Jones MW, Townsend P (1996) Volume distortion and morphing using disk fields. *Comput & Graphics*, 20, 4, 567-575.
- Claes P, Vandermeulen D, De Greef S, Willems G, and Suetens P (2006) Craniofacial reconstruction using a combined statistical model of face shape and soft tissue depths: methodology and validation. *Forensic Sci Int* 159 Suppl 1: S147-58.
- Claes P, Vandermeulen D, De Greef S, Willems G, Clement JG, and Suetens P (2010) Computerized craniofacial reconstruction: Conceptual framework and review. *Forensic Sci Int* 201: 138-45.
- Claes P, Vandermeulen D, De Greef S, Willems G, Suetens P (2006) Craniofacial reconstruction using a combined statistical model of face shape and soft tissue depths: methodology and validation. *Forensic Sci Int*, 159 Suppl 1, 147-58.
- Clement JG, and Marles MK (2005) *Computer-Graphic Facial Reconstruction*: Academic Press.
- Cutting C, Bookstein F, Haddad B, Dean D, and Kim D (1993) A spline-based approach for averaging three-dimensional curves and surfaces. *SPIE Conference on Mathematical Methods in Medical Imaging II*, Vol. 2035, pp. 29-43.
- Damas S, Cordon O, Ibañez O, Santamaría J, Alemán J, Botella M, and Navarro F (2010 - in press) *Forensic identification by computer-aided craniofacial superimposition: a survey*. *ACM Computing Surveys* (<http://sci2s.ugr.es/publications/ficheros/damas-et-al-acs09-revised.pdf>).
- Davy SL, Gilbert T, Schofield D, and Evison MP (2005) *Forensic Facial Reconstruction Using Computer Modeling Software*. In M Marks and JG Clement (eds.): *Computer-Graphic Facial Reconstruction*: Academic Press.
- Davy SL, Gilbert T, Schofield D, Evison MP (2005) In: *Computer-graphic Facial Reconstruction*. JG Clement and MK Marles (eds.). Elsevier, Academic Press, pp.183-196.
- Dean D, Bookstein FL, Koneru S, Lee JH, Kamath J, Cutting CB, Hans M, and Goldberg J (1998) Average African American three-dimensional computed tomography skull images: the potential clinical importance of ethnicity and sex. *J Craniofac Surg* 9: 348-58; discussion 359.

- DeCarlo D, Metaxas D, and Stone M (1998) An Anthropometric Face Model using Variational Techniques. International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH, Orlando (U.S.A.), pp. 67-74.
- De Greef S, and Willems G (2005) Three-dimensional craniofacial reconstruction in forensic identification: latest progress and new tendencies in the 21st century. *J Forensic Sci* 50: 12-7.
- De Greef S, Claes P, Mollemans W, Loubele M, Vandermeulen D, Suetens P, Willems G (2005) Semi-automated ultrasound facial soft tissue depth registration: method and validation. *J Forensic Sci*, 50(6): 1282-8.
- De Greef S, Claes P, Vandermeulen D, Mollemans W, Suetens P, and Willems G (2006) Large-scale in-vivo Caucasian facial soft tissue thickness database for craniofacial reconstruction. *Forensic Sci Int* 159 Suppl 1: S126-46.
- De Greef S, Claes P, Vandermeulen D, Mollemans W, Suerens P, Willems G (2006) Large-scale in-vivo Caucasian facial soft tissue thickness database for craniofacial reconstruction. *Forensic Sci Int*, 159, Suppl. 1, 126-46.
- De Greef S, Willems G (2005) Three-dimensional craniofacial reconstruction in forensic identification: latest progress and new tendencies in the 21st century. *J Forensic Sci*, 50(1): 12-7.
- Delaire J (1978) L'analyse architecturale et structurale crânio-faciale (de profil). *Rev Stomatol*, 79, 1, 1-33.
- Desbois C, Mallet C, Perrot R (1992) La méthode D.M.P. de reconstitution faciale dans l'identification médico-légale. *Paleobios*, 8, 1-2, 1-21.
- Diner PA, Ozeda P, Vaillant JM (1988) Anomalies morphologiques du menton (aux dépens des parties molles). In: *Le Menton*, Masson (ed.).
- Domaracki M, Stephan CN (2006) Facial soft tissue thicknesses in Australian adult cadavers. *J Forensic Sci*, 51(1): 5-10.
- Dorion RBJ (1983) Photographic superimposition. *J Forensic Sci*, 28, 3, 724-732.
- Dumont ER (1986) Mid-facial tissue depths of white children: an aid in facial feature reconstruction. *J Forensic Sci*, 31, 4, 1463-1469.
- Dérobot L (1974) *Médecine Légale*. Flammarion Médecine-Sciences (ed.), Paris.
- Eisenfeld J, Mischelevich DJ, Dann JJ, Bell WH (1975) Soft-tissue correlations and computer drawings for the frontal view. *The Angle Orthodontist*, 45, 4, 267-72.
- Ellis HD (1975) Recognising faces. *British J Psychology*, 66, 409-426.
- Evenhouse R, Rasmussen M, and Sadler L (1992) Computer-aided forensic facial reconstruction. *J Biocommun* 19: 22-8.
- Evenhouse R, Rasmussen M, Sadler L (1992) Computer-aided forensic facial reconstruction. *J Biocommunication*, 19, 2, 22-28.
- Fang S, Srinivasan R, Raghavan R, and Richtsmeier JT (2000) Volume morphing and rendering – An integrated approach. *Comput Aided Geom Des* 17: 59-81.
- Farkas LG (1994) *Anthropometry of the head and face*. New York: Raven Press.
- Farkas LG, Munro IR (1987) *Anthropometric facial proportions in medicine*. Springfield, IL, Charles C Thomas.
- Fedosyutkin BA, Nainys JV (1993) The relationship of skull morphology to facial features. In: MY İşcan, RP Helmer (eds.). *Forensic Analysis of the Skull*, Wiley-Liss, New York, pp. 199-213.
- Fourie Z, Damstra J, Gerrits PO, and Ren Y (2010) Accuracy and reliability of facial soft tissue depth measurements using cone beam computer tomography. *Forensic Sci Int* 199: 9-14.
- Garliff BP, Snow CC (1979) *From skull to visage*. *J of Biocommunic*, 6, 2, 27-30.
- George RM (1987) The lateral cranlographic method of facial reconstruction. *J Forensic Sci*, 32, 2, 1305-1330.
- George RM (1993) Anatomical and artistic guidelines for forensic facial reconstruction. In: MY İşcan, RP Helmer (eds.). *Forensic Analysis of the Skull*, Wiley-Liss, New York, pp. 215-227.
- Gerasimov MM (1949) Principles of reconstruction of the face on the skull. Moscow, Nauka [en langue russe]. Cité par: Fedosyutkin BA, Nainys JV (1993). The relationship of skull morphology to facial features In: MY İşcan, RP Helmer (eds.). *Forensic Analysis of the Skull*, Wiley-Liss, New York, pp. 199-213.
- Gerasimov MM (1955) Reconstruction of the face on the skull. Moscow, Nauka [en langue russe]. Cité par: Fedosyutkin BA, Nainys JV (1993). The relationship of skull morphology to facial features. In: MY İşcan, RP Helmer (eds.). *Forensic Analysis of the Skull*, Wiley-Liss, New York, pp. 199-213.
- Gerasimov MM (1971) *The Face Finder*. Philadelphia, Lippincott.
- Glazier J, Brash JC (1937) *The Medico-legal Aspects of the Buck Ruxton Case*. E. and S. Livingston, Edinburgh.
- Grüner O, Reinhard R (1959) Ein photographisches Verfahren zur Schädelidentifizierung. *Dtsch Z Gerichtl Med*, 47, 247-256. Cité par: Grüner O. In: MY İşcan, RP Helmer (eds.). *Forensic Analysis of the Skull*, Wiley-Liss, New York, pp. 29-45.
- Gunz P, Mitteroecker P, and Bookstein FL (2005) Semilandmarks in Three Dimensions. In DE Slice (ed.): *Modern Morphometrics in Physical Anthropology*. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, pp. 73-98.
- Gunz P, Mitteroecker P, Neubauer S, Weber GW, and Bookstein FL (2009) Principles for the virtual reconstruction of hominin crania. *J Hum Evol* 57: 48-62.



- Gökberk B, Salah AA, Akarun L, Etheve R, Riccio R, and Dugelay JL (2009) 3D Face Recognition: Guide to Biometric Reference Systems and Performance Evaluation: Springer.
- Hartkens T, Rohr K, and Stielh HS (2002) Evaluation of 3D Operators for the Detection of Anatomical Point Landmarks in MR and CT Images. *Computer Vision and Image Understanding* 86: 118-136.
- Helmer RP (1987) Identification of the cadaver remains of Josef Mengele. *J Forensic Sci*, 32, 6, 1622-1644.
- Helmer RP, Grüner O (1977) Vereinfachte Schädelidentifizierung nach dem Superprojektionsverfahren mit Hilfe einer Video-Anlage. *Z Rechtsmed*, 80, 183-187.
- Helmer RP, Raab U, Mirtler M, Schmidt A, Ruprecht ST, Helmer R (1997) Identification of unrecognisable persons by combined features of face and body. Proceedings of the 7th Scientific Meeting of the International Association for Craniofacial Identification, Melbourne, Australia, 30 September-3 October 1997.
- Helmer RP, Röhricht S, Petersen D, Möhr F (1993) Assessment of the reliability of facial reconstruction. In: MY İşcan, RP Helmer (eds.). *Forensic Analysis of the Skull*, Wiley-Liss, New York, pp. 229-246.
- His W (1895) Johann Sebastian Bach. Forschungen über dessen Grabstätte, Gebeine und Antlitz. Bericht an den Rath der Stadt Leipzig. Leipzig, FCW Vogel. Cité par: Krogman WM, İşcan MY (1986) *The Human Skeleton in Forensic Medicine*. Springfield, Ill. Charles C Thomas.
- Hodson G, Liebetmann S, Wright P (1985) In vivo measurements of facial tissue thickness in American Caucasoid children. *J Forensic Sci*, 30, 4, 1100-1112.
- Hoffman BE, McConarthy DA, Coward M, Sadler L (1991) Relationship between the piriform aperture and interalar nasal widths in adult males. *J Forensic Sci*, 36, 1152-61.
- Iren PX (1987) Identification of skulls by video superimposition. *J Forensic Sci*, 32, 173-188.
- İşcan MY (1988a) The use of videosuperimposition for the identification of photographs. Presented at the International Symposium Advances in Skull Identification via Video Superimposition, 3-5 August, Kiel, Abstract no 9.
- İşcan MY (1988b) Rise of forensic anthropology. *Yearbook of Physical Anthropology*, 31, 203-230.
- İşcan MY (1993) Introduction of techniques for photographic comparison: potential and problems. In: MY İşcan, RP Helmer (eds.). *Forensic Analysis of the Skull*, Wiley-Liss, New York, pp. 57-70
- İşcan MY, Helmer RP (eds.) (1993) *Forensic Analysis of the Skull*, Wiley-Liss, New York.
- İşcan MY, Loth SR (2000) Photo image identification. *Encyclopedia of Forensic Sciences*. JA Siegel, PJ Saukko, GC Knupfer (eds.). Academic Press, San Diego, pp. 795-807.
- Jones M (2001) Facial Reconstruction Using Volumetric Data. In T Ertl, B Girod, G Greiner, H Niemann and H Seidel (eds.): *Vision, Modeling, and Visualization*. Stuttgart (Germany): IOS Press.
- Kermi A (2008) Reconstructions faciales à partir d'images tridimensionnelles de crânes humains par recalage et modèle déformable pour l'identification des personnes. *Thèse de doctorat*. École nationale supérieure des Télécommunications de Paris, Université Badji-Mokhtar d'Annaba.
- Koch RM, Gross MH, Carls FR, Büren DFV, Fankhauser G, and Parish YH (1996) Simulating facial surgery using finite element models. *Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. ACM, pp. 421-428.
- Koelmeyer TD (1982) Videocamera superimposition and facial reconstruction as an aid to identification. *American J Forensic Med Pathol*, 3, 1, 45-48.
- Krogman WM, İşcan MY (1986) *The Human Skeleton in Forensic Medicine*. Charles C Thomas, Springfield, Ill.
- Kybic J, and Unser M (2005) Registration for Biomedical Applications. In JS Suri, DL Wilson and S Laxminarayan (eds.): *Handbook of biomedical image analysis*. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, pp. 339-392.
- Kähler K, Haber J, and Seidel H (2003) *Reanimating the dead: reconstruction of expressive faces from skull data*. International Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques archive, ACM SIGGRAPH, San Diego, California, pp. 554-561.
- Lebedinskaya GV, Balueva TS, Veselovskaya EV (1993) Principles of facial reconstruction. In: MY İşcan, RP Helmer (eds.). *Forensic Analysis of the Skull*, Wiley-Liss, New York, pp. 183-198.
- Lefèvre P, Van Sint Jan S, Beauchier J-P, and Rooze M (2007) Hand Skin Reconstruction from Skeleton Landmarks. *Hands and Identification*. *Int J Legal Med* 121: 511-515.
- Legend F, Perlemuter L, Vandembrouck C (1981) *Cahiers d'Anatomie ORL*. Masson (ed.), Paris, 3ème édition.
- Lerios A, Garfinkle C, Levoy M (1995) Feature-based volume metamorphosis. In: *SIGGRAPH Computer Graphics 95*, Los Angeles, pp. 449-456.
- Lerios A, Garfinkle CD, and Levoy M (1995) Feature-Based Volume Metamorphosis. In *Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series*, ACM SIGGRAPH, pp. 449-456.
- Leth P (2007) The use of CT scanning in forensic autopsy. *For Sci Med Pathol* 3: 65-69.
- Lynnerup N (2006) Facial recognition, photogrammetry and gait analysis: matching perpetrators recorded on surveillance video and suspects. *Proceedings of XXth Congress of International Academy of Legal Medicine*, Budapest (Hungary), 23-26 August 2006, p. 132
- Lynnerup N, Vedel J (2005) Person identification by gait analysis and photogrammetry. *J Forensic Sci*, 50(1): 112-8.

- Lévignac J (1988) *Le Menton* (Monographies de chirurgie réparatrice). Masson (ed.), Paris.
- Macho GA (1986) *An appraisal of plastic reconstruction of the external nose*. *J Forensic Sci*, 31, 4, 1391-1403.
- Macho GA (1989) *Descriptive morphological features of the nose: an assessment of their importance for plastic reconstruction*. *J Forensic Sci*, 34, 4, 902-11.
- Majumdar T, Sinha P (1989) *Photographs of the human face and broken projective symmetry*. *J Forensic Sci Society*, 29, 387-395.
- Mang A, Müller J, and Buzing TM (2006) *A Multi-Modality Computer-Aided Framework Towards Postmortem Identification*. *Journal of Computing and Information Technology* 14: 7-19.
- Miyasaka S, Yoshino M, Imaizumi K, Seta S (1995) *The computer-aided facial reconstruction system*. *Forensic Sci Int*, 74, 1-2, 155-65.
- Moore CE (1981) *A problem in human variation: the facial tissue thicknesses of caucasoids, negroids, and mongoloids*. *PhD Dissertation*, The University of New Mexico, Albuquerque, New Mexico.
- Nelson LA, and Michael SD (1998) *The application of volume deformation to three-dimensional facial reconstruction: a comparison with previous techniques*. *Forensic Sci Int* 94: 167-81.
- Nickerson BA, Fitzhorn PA, Koch SK, Charney M (1991) *A methodology for near-optimal computational superimposition of two-dimensional digital facial photographs and three-dimensional cranial surface meshes*. *J Forensic Sci*, 36, 2, 480-500.
- Odin G, Balaguer Th, Mafart B, Quatrehomme G (2000) *Reconstruction nasale bi et tridimensionnelle: intérêt du positionnement de la pointe nasale*. In: *L'Identité Humaine en Question*. Actes du colloque organisé par le Conseil Général du Val-de-Marne et l'Association pour la recherche et la publication d'études archéologiques (ARPEA), 26 au 28 Mai 1999. Collection Paléanthropologie et Paléopathologie ossense, Editions Arcom, pp. 316-322.
- Paysan P, Lüthi M, Albrecht T, Lerch A, Amberg B, Santini F, and Vetter T (2009) *Face Reconstruction from Skull Shapes and Physical Attributes*. *Pattern Recognition Lecture Notes in Computer Science* 5748/2009: 232-241.
- Paysan A, Quatrehomme G (2002) *Nouvelle méthode de calcul d'angles crâniens en anthropologie médico-légale*. *Journal de Médecine Légale Droit Médical*, 45, 1, 43-51.
- Pearson K (1926) *On the skull and portraits of George Buchanan*. *Biometrika*, 18, 233-256.
- Pei Y, Zha H, and Yuan Z (2008) *The Craniofacial Reconstruction from the Local Structural Diversity of Skulls*. *Computer Graphics Forum* 27: 1711-1718.
- Pennec X, and Joshi S (2008) *Proceedings of the Second International Workshop on Mathematical Foundations of Computational Anatomy – Geometrical and Statistical Methods for Modelling Biological Shape Variability*. New York.
- Pesce Delfino V, Vacca E, Potente F, Letini T, Colonna M (1993) *Shape analytical morphometry in computer-aided skull identification via video superimposition*. In: MY İşcan, RP Helmer (eds.), *Forensic Analysis of the Skull*, Wiley-Liss, New York, pp. 131-159.
- Plasencia J (1999) *Landmark-based 3D Mesh Warping for bone-skin reconstruction*. *International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Interactive Digital Media'99*, Plzen-Bory, Czech Republic.
- Pouliquen Y (1984) *Précis d'Ophthalmologie*. Masson (ed.), Paris.
- Prieels F, Hirsch S, and Hering P (2009) *Holographic topometry for a dense visualization of soft tissue for facial reconstruction*. *Forensic Sci Med Pathol* 5: 11-6.
- Pötsch L, Herz U, Leichoff H, Urban R, Ritter Ch (1994) *Zur postmortalen Gesichtrekonstruktion. Arbeitskonzept einer schnellen Identifizierungsmöglichkeit*. *Rechtsmedizin*, 4, 2, 61-68.
- Quatrehomme G (2000) *Reconstruction faciale: intérêts anthropologique et médico-légal*. *Thèse Sciences*, Université de Bordeaux I, 6 Juin 2000.
- Quatrehomme G (2005) *Facial restoration*. In: *Encyclopedia of Forensic and Legal Medicine*. J Paynes-James, R Byard, T Corey, C Henderson (eds.), pp. 28-34.
- Quatrehomme G, Balaguer T, Staccini P, and Alunni-Perret V (2007) *Assessment of the accuracy of three-dimensional manual craniofacial reconstruction: a series of 25 controlled cases*. *Int J Legal Med* 121: 469-75.
- Quatrehomme G, Cotin S, Subsol G, Delingette H, Garidel Y, Grévin G, Fridrich M, Baillet P, and Ollier A (1997) *A fully three-dimensional method for facial reconstruction based on deformable models*. *J Forensic Sci* 42: 649-52.
- Quatrehomme G, Cotin S, Subsol G, Delingette H, Garidel Y, Grévin G, Fridrich M, Baillet P, Ollier A (1997) *A fully three-dimensional method for facial reconstruction based on deformable models*. *J Forensic Sci*, 42, 4, 647-650.
- Quatrehomme G, Garidel Y, Grévin G, Liao ZG, Baillet P, Ollier A (1995) *Method for identifying putrefied corpses by facial casting*. *Forensic Sci Int*, 74, 1-2, 115-124.
- Quatrehomme G, Garidel Y, Grévin G, Liao ZG, Boublienza A, Ollier A (1996) *Facial casting as a method to help identify severely disfigured corpses*. *J Forensic Sci*, 41, 3, 518-520.
- Quatrehomme G, İşcan MY (2000) *Computerized facial reconstruction*. *Encyclopedia of Forensic Sciences*. JA Siegel, PJ Saukko, GC Knupfer (eds.), Academic Press, San Diego, pp. 773-779.
- Quatrehomme G, Rongé D (2003) *La Recommandation no R(99)3 du Comité des Ministres aux Etats membres, relative à l'harmonisation des règles en matière d'autopsie médico-légale*. *J Médecine Légale Droit Médical*, 46, 6.
- Quatrehomme G, Subsol G (2005) *Classical non-computer-assisted craniofacial reconstruction*. In: *Computer-graphic Facial Reconstruction*. JG Clement and MK Marks (eds.), Elsevier, Academic Press, pp. 15-32.

- Quatrehomme G., Cotin S., Alunni V., Garidel Y., Grévin G., Baillet P., Ollier A., Ayache N (1999) *La superposition, la restauration et la reconstruction faciales: une aide à l'identification médico-légale*. *Journal de Médecine Légale Droit Médical*, 42, 1, 11-22.
- Rakover SS (2005) Two methodologies of memory research: "explanation-testing" and "reconstruction". In: Computer-graphic Facial Reconstruction. JG Clement and MK Marks (eds.). Elsevier, Academic Press, pp. 255-283.
- Rathbun TA (1984) Personal identification: facial reproductions. In: Rathbun TA, Bulkstra JE (Eds.). *Human Identification: case studies in forensic anthropology*. Springfield, Charles C Thomas, 1984, pp. 347-356.
- Reddy KSN (1973) Identification of dismembered parts: the medicolegal aspects of the Nagaraga case. *Forensic Sciences*, 2, 351-374.
- Rhine JS, Campbell HR (1980) Thickness of facial tissues in American blacks. *J Forensic Sci*, 25, 4, 847-858.
- Rhine JS, Moore CE, Weston JT (eds.) (1982) *Facial Reproduction: Tables of Facial Tissue Thicknesses of American Caucasoids in Forensic Anthropology*. Maxwell Museum Technical Series 1, Albuquerque, New Mexico.
- Ricketts RM (1968) Esthetics, environment, and the law of the lip relation. *Am J Orthodontics*, 49, 11, 826-850.
- Rifa H, Bloch I, Hutchinson S, Wlart J, and Gathcro L (2000) Segmentation of the skull in MRI volumes using deformable model and taking the partial volume effect into account. *Med Image Anal* 4: 219-33.
- Rogers SL (1987) *Personal Identification from Human Remains*. Charles C Thomas, Springfield, Il.
- Rogowska J (2000) Overview and fundamentals of medical image segmentation. In IN Bankman (ed.): *Handbook of medical imaging book contents*: Academic Press, pp. 69-85.
- Rouvière H (1970) *Anatomie humaine*, Tome I (tête et cou). Paris, Masson et Cie (eds).
- Sadler Cité par: Ubelaker DH (1991). *Human Skeletal Remains. Manuals of Archaeology, Library of Congress*, 2nd edition, Taraxacum Washington p. 124.
- Seta S, Yoshino M (1993) A combined apparatus for photographic and video superimposition. In: İşcan MY, Helmer RP (eds.). *Forensic Analysis of the Skull: Craniofacial analysis, reconstruction, and identification*. Wiley-Liss, New York, pp. 161-169.
- Shahrom AW, Vanezis P, Chapman RC, Gonzales A, Blenkinsop C, Rasti ML (1996) Techniques in facial identification: computer-aided facial reconstruction using a laser scanner and video superimposition. *Infer J Legal Med*, 108, 4, 194-200.
- Shepherd J (1981) Social factors in face recognition. In: G Davies, HD Ellis, J Shepherd (eds.). *Perceiving and Remembering Faces*. Academic Press, London, pp. 55-79.
- Sholukha V, Chapman T, Salvia P, Moiseev F, Euran F, Rooze M, and Van Sint Jan S (in press) Femur shape prediction by multiple regression based on quadric surface fitting. *J Biomech*.
- Sholukha V, Van Sint Jan S, Snoeck O, Salvia P, Moiseev F, and Rooze M (2009) Multidimensional regression for joint position prediction. *J Biomech* 42: 319-324.
- Sills JD (1994) Computer photographic skull reconstruction. Methods used in facial restoration. In: Farkas LG (ed.). *Anthropometry of the Head and Face*. 2nd edition, Raven Press, pp 187-190.
- Smeets D, Claes P, Vandermeulen D, and Clement JG (2010) Objective 3D face recognition: Evolution, approaches and challenges. *Forensic Sci Int* 201: 125-132.
- Spitz WU, Fisher R (1980) *Medicolegal Investigation of Death*. Charles C Thomas, Springfield, Il.
- Starbuck JM, and Ward RE (2007) The affect of tissue depth variation on craniofacial reconstructions. *Forensic Sci Int* 172: 130-6.
- Stephan CN (2002) Do resemblance ratings measure the accuracy of facial approximations? *J Forensic Sci*, 47(2): 239-43.
- Stephan CN (2003) Anthropological facial reconstruction: recognizing the fallacies, "unembracing" the errors, and realizing method limits. *Sci Justice*, 43(4): 193-200.
- Stephan CN, and Arthur RS (2006) Assessing facial approximation accuracy: how do resemblance ratings of disparate faces compare to recognition tests? *Forensic Sci Int* 159 Suppl 1: S159-63.
- Stephan CN, Arthur RS (2006) Assessing facial approximation accuracy: how do resemblance ratings of disparate faces compare to recognition tests? *Forensic Sci Int*, 159 Suppl 1, 159-63.
- Stephan CN, Henneberg M (2001) Building faces from dry skulls: are they recognized above chance rates? *J Forensic Sci*, 46(3): 432-40.
- Stephan CN, Henneberg M (2003) Predicting mouth width from inter-canine width - a 75 % rule. *J Forensic Sci*, 48(4): 725-7.
- Stephan CN, Henneberg M (2006) Recognition by forensic facial approximation: case specific examples and empirical tests. *Forensic Sci Int*, 156(2-3): 182-91.
- Stephan CN, Henneberg M, Sampson W (2003) Predicting nose projection and pronasale position in facial approximation: a test of published methods and proposal of new guidelines. *Am J Phys Anthropol*, 122(3): 240-50.
- Stephan CN, Penton-Voak IS, Clement JG, Henneberg M (2005) Ceiling recognition limits of two-dimensional facial approximations constructed using averages. In: *Computer-graphic Facial Reconstruction*. JG Clement and MK Marks (eds.). Elsevier, Academic Press, pp. 199-219.
- Subramanyan K, and Dean D (2000) A procedure to average 3D anatomical structures. *Med Image Anal* 4: 317-334.
- Subsol G, and Quatrehomme G (2005) Automatic 3D Facial Reconstruction by Feature-Based Registration of a Reference Head. In M Marks and JG Clement (eds.): *Computer-graphic Facial Reconstruction*: Academic Press.



- Subsol G, Quatrehomme G (2005) *Automatic 3D facial reconstruction by feature-based registration of a reference head*. In: *Computer-graphic Facial Reconstruction*. JG Clement and MK Marks (eds.). Elsevier, Academic Press, pp.79-101.
- Subsol G, Thirion JP, Ayache N (1998) A general scheme for automatically building 3D morphometric anatomical atlases: application to a skull atlas. *Medical Image Analysis*, 2, 1, 37-60.
- Subtelny JD (1959) A longitudinal study of soft tissue facial structures and their profile characteristics, defined in relation to underlying skeletal structures. *Am J Orthodontics*, 45, 7, 481, 481-507.
- Taylor JA, Brown KA (1998) *Superimposition techniques*. In: Clement JG, Ranson DL (eds.) (1998). *Craniofacial Identification in Forensic Medicine*. Arnold (ed.), London, pp. .
- Taylor KT (1990) *Technique of facial reconstruction drawing*. Proceedings of International Symposium on the Forensic Aspects of Mass Disasters and Crime Scene Reconstruction, June 23-29, FBI Academy, Quantico, Virginia, pp. 281-284.
- Taylor KT (2001) *Forensic Art and Illustration*. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Tilotta F, Richard F, Glaunes J, Betar M, Gey S, Verdeille S, Rozenholc Y, and Gaudy JF (2009) *Construction and analysis of a head CT-scan database for craniofacial reconstruction*. *Forensic Sci Int* 191 : 112 e1-12
- Tilotta FM, Glaunes JA, Richard FJ, and Rozenholc Y (2010) A local technique based on vectorized surfaces for craniofacial reconstruction. *Forensic Sci Int* 200 : 50-9.
- Tolleth H (1978) Artistic anatomy, dimensions, and proportions of the external ear. *Clinics in Plastic Surgery*, 5, p. 337.
- Tu P, Hartley R, Lorenson W, Alyassin A, Gupta R, and Heier L (2005) *Face Reconstructions using Flesh Deformation Modes*. Computer Graphic Facial Reconstruction: Academic Press.
- Tu P, Hartley RI, Lorenson WE, Alyassin A, Gupta R, Heier L (2005) *Face reconstructions using flesh deformation modes*. In: *Computer-graphic Facial Reconstruction*. JG Clement and MK Marks (eds.). Elsevier, Academic Press, pp. 145-162.
- Turner WD, Brown RE, Kelliber TP, Tu PH, Taister MA, and Miller KW (2005) A novel method of automated skull registration for forensic facial approximation. *Forensic Sci Int* 154 : 149-58.
- Ubelaker DH (1991) *Human Skeletal Remains. Manuals of Archaeology*, Library of Congress, 2nd edition, Taraxacum Washington.
- Vandermeulen D, Claes P, Loeckx D, De Greef S, Willems G, and Suetens P (2006) Computerized craniofacial reconstruction using CT-derived implicit surface representations. *Forensic Sci Int* 159 Suppl 1 : S164-74.
- Vandermeulen D, Claes P, Loeckx D, De Greef S, Willems G, Suetens P (2006) Computerized craniofacial reconstruction using CT-derived implicit surface representations. *Forensic Sci Int*, 159 Suppl 1, 164-74.
- Vanezis M (2007) *Forensic Facial Reconstruction Using 3-D Computer Graphics: Evaluation and Improvement of its Reliability in Identification*. PhD Thesis, University of Glasgow.
- Vanezis P, Blowes RW, Linney AD, Tan AC, Richards R, and Neave R (1989) Application of 3-D computer graphics for facial reconstruction and comparison with sculpting techniques. *Forensic Sci Int* 42 : 69-84.
- Vanezis P, Blowes RW, Linney AD, Tan AC, Richards R, Neave R (1989) Application of 3-D computer graphics for facial reconstruction and comparison with sculpting techniques. *Forensic Sci Int*, 42, 1-2, 69-84.
- Vanezis P, Vanezis M, McCombe G, and Niblett T (2000) Facial reconstruction using 3-D computer graphics. *Forensic Sci Int* 108 : 81-95.
- Van Sint Jan S (2005a) *Introducing Anatomical and Physiological Accuracy in Computerized Anthropometry for Increasing the Clinical Usefulness of Modeling Systems*. *Critical Reviews of Physical and Rehabilitation Medicine* 17 : 249-274.
- Van Sint Jan S (2005b) *The VAKHUM project: virtual animation of the kinematics of the human*. In K Gielo-Perczak (ed.): *Novel methods and methodologies in biomechanics as related to human systems and ergonomics theory: Theoretical Issues in Ergonomics Science (TIES)*, 6(3-4).
- Van Sint Jan S, Clapworthy G, and Rooze M (1998) *Visualization of combined motions in human joints*. *IEEE Computer Graphics and Applications* 18 : 10-14.
- Van Sint Jan S, Wu G, and Allard P (2007) *Color atlas of skeletal landmark definitions: guidelines for reproducible manual and virtual palpation*. Edinburgh: Churchill Livingstone - Elsevier.
- Viceconti M, Taddei F, Van Sint Jan S, Leardini A, Cristofolini L, Stea S, Baruffaldi F, and Baleani M (2008) *Multiscale modelling of the skeleton for the prediction of the risk of fracture*. *Clin Biomech (Bristol, Avon)* 23 : 845-52.
- Vignal J-N (1998) *Reconstruction faciale assistée par ordinateur: données tomographiques, déformation d'image ou «warping»*. Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux 1.
- Vignal JN (2000) *Technique de reconstitution faciale par déformation d'image*. In: *L'Identité Humaine en Question*. Actes du colloque organisé par le Conseil Général du Val-de-Marne et l'Association pour la recherche et la publication d'études archéologiques (ARPEA), 26 au 28 Mai 1999. Collection Paléanthropologie et Paléopathologie osseuse, Editions Artec, pp. 332-341.
- Walker GE (1984) *Computer-aided profile reconstruction*. In: *Handbook of Forensic Archaeology and Anthropology-Appendix C*. Morse D, Duncan J, Stoutamire J (eds.), Florida State University Foundation, Inc., Tallahassee, FL 1984
- Webster G (1955) *Photography as an aid in identification: the Plumbago Pit case*. *Police J*, 28, 185-192.

- Weinberg SM, and Kolar JC (2005) Three-dimensional surface imaging: limitations and considerations from the anthropometric perspective. *J Craniofac Surg* 16: 847-51.
- Welcker H (1883) Schiller's Schädel und Todtenmaske, nebst Mittheilungen über Schädel und Todtenmaske Kant's. Braunschweig, Fr *Viehweg und Sohn*. Cité par: MY İşcan. Craniofacial image analysis and reconstruction. In: MY İşcan, RP Helmer (eds.), *Forensic Analysis of the Skull*, Wiley-Liss, New York, pp. 1-9.
- Wiley DE, Amenta N, Alcantara DA, Ghosh D, Kil YJ, Delson E, Harcourt-Smith W, Rohlf FJ, St John K, and Hamann B (2005) Evolutionary Morphing. *Proceedings of IEEE Visualization*.
- Wilhelms J, and Gelder AV (1997) Anatomically based modeling. *Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, ACM Press/ Addison-Wesley Publishing Co*, pp. 173-180.
- Wilkinson C (2010) Facial reconstruction—art or artistic anatomy? *J Anat* 216: 235-50.
- Wilkinson C, Rynn C, Peters H, Taister MA, Kau CH, and Richmond S (2006) A blind accuracy assessment of computer-modeled forensic facial reconstruction using computed tomography data from live subjects. *Forensic Science, Medicine and Pathology* 2: 179-187.
- Wilkinson CA (2005) Computerized Forensic Facial Reconstruction: A Review of Current Systems. *For Sci Med Pathol* 1: 173-178.
- Yoshino M (1981) [en japonais] Cité par: Yoshino M, Imaizumi K, Miyasaka S, Seta S (1995). Evaluation of anatomical consistency in cranio-facial superimposition images. *Forensic Sci Int*, 74, 125-134.
- Yoshino M (2005a) Facial image identification system based on 3D physiognomic data. In: *Computer-graphic Facial Reconstruction*. JG Clement and MK Marks (eds.). Elsevier, Academic Press, pp. 347-362.
- Yoshino M (2005b) A new retrieval system using a 3D facial image database. In: *Computer-graphic Facial Reconstruction*. JG Clement and MK Marks (eds.). Elsevier, Academic Press, pp.363-375.
- Yoshino M, Imaizumi K, Miyasaka S, Seta S (1995) Evaluation of anatomical consistency in cranio-facial superimposition images. *Forensic Sci Int*, 74, 125-134.
- Yoshino M, Seta S (1989) Personal identification of the human skull. Superimposition and radiographic technique. *Forensic Sci Rev*, 1, 23-42.
- Yoshino M, Seta S (2000) Skull-photo superimposition. *Encyclopedia of Forensic Sciences*. JA Siegel, PJ Saukko, GC Knupfer (eds.), Academic Press, San Diego, pp. 807-815.
- Zavala A, Pacey J (Eds.) (1972) *Personal Appearance Identification*. Charles C Thomas, Springfield, Il.