



Le génie tissulaire - Une perspective de la profession d'ingénieur

Préparé pour

le Conseil canadien des ingénieurs (CCI)

par

**Michael S. Kallos, Ph. D., P.Eng. et Chan Wirasinghe, Ph. D., P.Eng., doyen
Faculté de génie
University of Calgary**

Août 2002

Sommaire

La profession d'ingénieur a connu des changements importants au cours des dernières décennies. Au lieu d'œuvrer dans des disciplines traditionnelles uniques, les ingénieurs se dirigent de plus en plus vers des domaines multidisciplinaires. La bioingénierie est le domaine qui connaît le rythme de croissance le plus rapide. La bioingénierie regroupe tous les domaines où les ingénieurs travaillent avec des systèmes biologiques. Les applications de la bioingénierie portent sur plusieurs domaines, dont la biotechnologie et le génie biomédical. Le génie tissulaire est l'une des applications spécifiques de la bioingénierie. Le présent document définit et explique le génie tissulaire, le rôle que les ingénieurs seront appelés à jouer dans ce nouveau secteur, ainsi que les mesures que la profession devrait prendre pour s'assurer que ce domaine bénéficie d'un apport suffisant de professionnels bien formés et compétents. Il est évident que les travaux de génie tissulaire seront effectués par une équipe composée d'ingénieurs, de scientifiques, de professionnels de la santé et d'autres intervenants. Au sein de cette équipe, les ingénieurs joueront un rôle clé dans des applications qui relèvent de l'exercice du génie.

Table des matières

Sommaire	ii
Table des matières	iii
1.0 Introduction	1
1.1 Bioingénierie	1
1.2 Génie biomédical	3
1.3 Génie tissulaire	4
1.4 Résumé	4
2.0 Principes du génie tissulaire	5
2.1 Exemple d'application technologique – Reconstitution d'os par génie tissulaire	7
3.0 Le « génie » dans le génie tissulaire	9
4.0 L'exercice du génie tissulaire	12
4.1 La formation en génie tissulaire	12
4.2 Le domaine du génie tissulaire	14
4.3 Les aspects de l'ingénierie en génie tissulaire	17
5.0 Mesures prises par la profession	19
5.1 Éducation	19
5.2 Exercice de la profession	20
5.3 Sensibilisation du public	22
5.4 Rôle du gouvernement	23
6.0 Conclusion	24
7.0 Références	25
8.0 Annexes	27
8.1 Annexe A – Glossaire	27
8.2 Annexe B – Programmes de bioingénierie dans les universités canadiennes offrant des programmes d'ingénierie accrédités	30

▷ 1.0 Introduction

À l'heure actuelle, la dégénérescence de tissus et la défaillance d'organes représentent la moitié des coûts de santé aux États-Unis (Persidis, 2000). Il est peu probable que la situation au Canada soit très différente. Bien que les greffes soient communément employées comme solution aux défaillances d'organes, de nombreux patients en attente d'une greffe ne la recevront pas à temps. Il n'y a pas, jusqu'ici, de solution à long terme à ce problème. Le génie tissulaire, qui émerge comme solution potentielle et (ou) comme solution de rechange à d'autres thérapies, suscite l'intérêt de plusieurs sources universitaires et industrielles. La profession d'« ingénieur tissulaire » sera l'une des professions les plus prisées au 21^e siècle (Rawe, 2000). Le génie tissulaire vise à aider le corps à régénérer des fonctions plutôt que de masquer les symptômes comme c'est le cas de nombreuses thérapies aujourd'hui.

1.1 Bioingénierie

Le génie peut être défini, dans les grandes lignes, comme l'application de principes scientifiques et mathématiques pour trouver des solutions à des problèmes pratiques. Cette définition entre d'ailleurs dans celle proposée par l'Association of Professional Engineers, Geologists and Geoscientists of Alberta (APEGGA) (annexe A). Les United States National Institutes of Health (NIH) ont publié la définition suivante de la bioingénierie (McIntyre *et al.*, 2000) :

Qu'est-ce que la bioingénierie ? - La bioingénierie réunit la physique, la chimie, les mathématiques, les sciences informatiques et les principes du génie pour étudier la biologie, la médecine, le comportement et la santé. Elle élabore des concepts fondamentaux, elle enrichit le champ de connaissances depuis le niveau moléculaire jusqu'au niveau organique, et elle met au point des approches novatrices dans les domaines de la biologie, des matériaux, des procédés, des implants, des dispositifs et de l'informatique pour prévenir, diagnostiquer et traiter les maladies, pour réhabiliter les patients et pour améliorer la santé (NIH Working Definition of Bioengineering - 24 juillet 1997).

Dans la figure 1, la bioingénierie est illustrée comme une nouvelle discipline du génie. La figure se divise en disciplines, en domaines et en applications. Une discipline traditionnelle est définie comme un domaine d'études qui applique les notions de physique, de chimie et des mathématiques pour trouver des solutions à des problèmes précis. Les disciplines traditionnelles du génie comprennent le génie chimique, le génie civil, le génie électrique, la géomatique, le génie des matériaux et le génie mécanique. Le génie de l'environnement fait exception, puisqu'il applique aussi les principes de la biologie. Une nouvelle discipline - la bioingénierie - fait aussi appel à la biologie en plus de la physique, de la chimie et des mathématiques. Les disciplines du génie sont appliquées à des domaines, qui, pour leur part, sont des champs de spécialisation de l'une des disciplines. Dans le cas présent, les deux grands domaines qui font partie de la bioingénierie sont le génie biomédical et la biotechnologie. Le génie biomédical est une application spécifique des principes de génie pour résoudre des problèmes médicaux. Il comprend l'instrumentation, l'imagerie, le traitement de signaux, la modélisation, la biomécanique, les biomatériaux et le génie tissulaire. La biotechnologie regroupe le génie biomédical, la fermentation, la bioséparation et le génie des bioréactions. La biotechnologie (du point de vue de l'ingénierie) est principalement l'application de principes du génie à la production de molécules biochimiques, ou l'utilisation de catalyseurs biochimiques dans les processus (p. ex., la levure dans la production de bière). Selon une définition du *Petit Robert*, une application est une « utilisation possible, un cas d'utilisation ». Dans le cas présent, la connaissance spécifique d'un domaine d'ingénierie est appliquée à certains secteurs d'activité. Les applications du génie biomédical (y compris le génie tissulaire) englobent la santé et plusieurs autres secteurs d'activité.

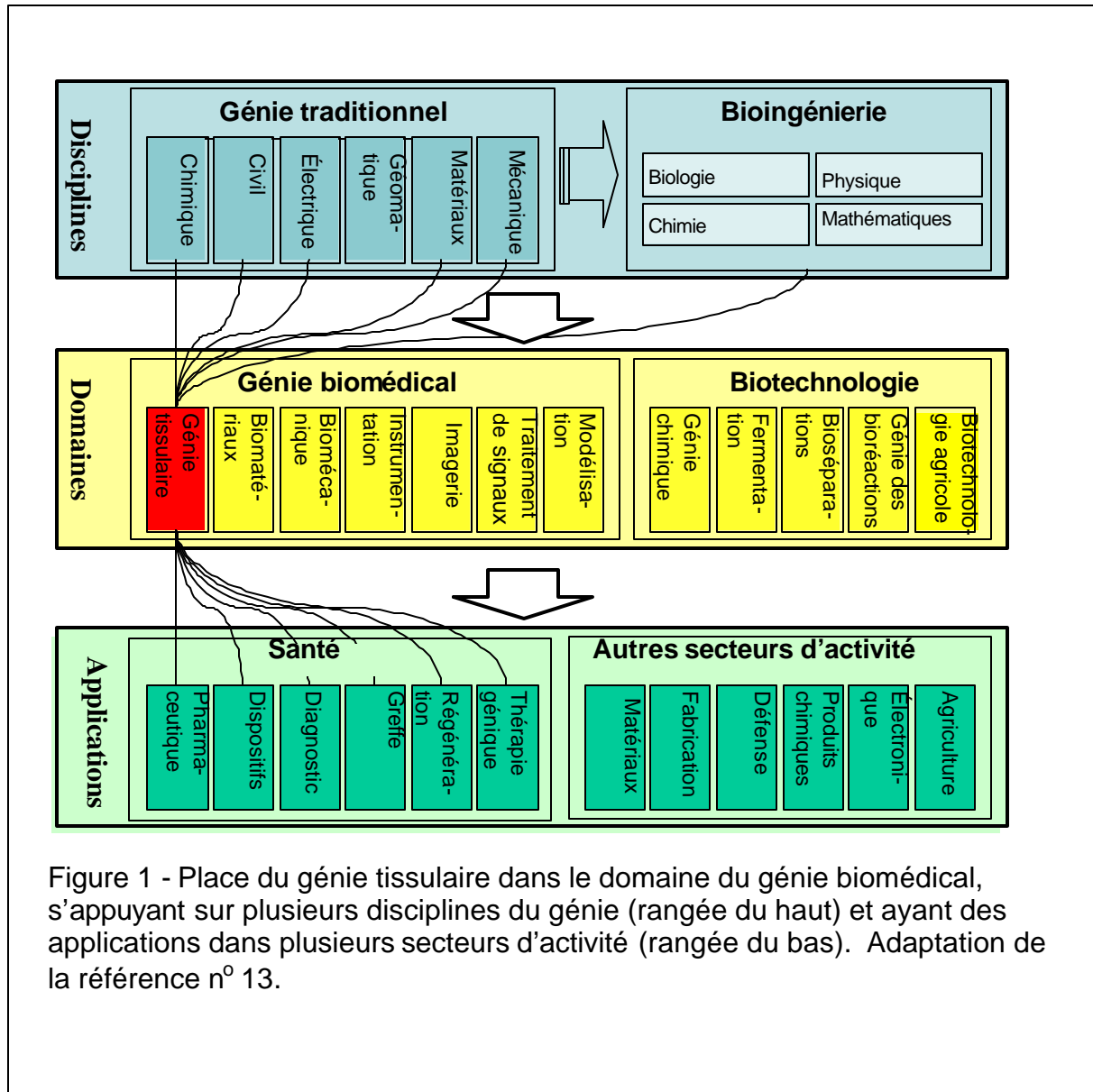


Figure 1 - Place du génie tissulaire dans le domaine du génie biomédical, s'appuyant sur plusieurs disciplines du génie (rangée du haut) et ayant des applications dans plusieurs secteurs d'activité (rangée du bas). Adaptation de la référence n° 13.

1.2 Génie biomédical

La Whitaker Foundation définit le génie biomédical comme suit (site Web de la Whitaker Foundation) :

« Le génie biomédical est une discipline qui enrichit les connaissances en génie, en biologie et en médecine, et qui améliore la santé humaine par l'entremise d'activités interdisciplinaires qui intègrent les sciences de l'ingénierie aux sciences biomédicales et à l'exercice clinique. Il comprend :

1. L'acquisition de nouvelles connaissances et la compréhension de systèmes vivants par l'application innovatrice et fondamentale de techniques expérimentales et analytiques fondées sur les sciences de l'ingénierie.

2. Le développement de nouveaux outils, algorithmes, procédés et systèmes qui font progresser la biologie et la médecine et qui améliorent l'exercice de la médecine et les soins de santé. »

La Whitaker Foundation est une fondation qui appuie principalement la recherche médicale interdisciplinaire, notamment le génie biomédical. La fondation a versé plus de 615 millions de dollars aux universités et aux écoles de médecine pour appuyer la recherche, les étudiants de deuxième et troisième cycles, l'élaboration de programmes et la construction de nouvelles installations. Comme l'illustre la figure 1, le génie biomédical englobe le génie tissulaire et plusieurs autres applications des principes de génie pour résoudre des problèmes touchant à la médecine et à la santé.

1.3 Génie tissulaire

La place du génie tissulaire par rapport à la profession d'ingénieur est illustrée à la figure 1. Les lignes fines relient le génie tissulaire aux disciplines de génie concernées (au-dessus) et aux applications précises de cette technologie (en dessous). Une explication plus complète du génie tissulaire se trouve à la section 2.0.

1.4 Résumé

Le paragraphe suivant présente les connaissances et le rôle des ingénieurs dans les diverses disciplines, domaines et applications illustrés à la figure 1. Un ingénieur reçoit en règle générale une formation en mathématiques, en physique

et en chimie, et applique ces connaissances fondamentales pour résoudre des problèmes pratiques dans son domaine (p. ex., génie chimique). Un bio-ingénieur reçoit en plus une formation en biologie et applique ses connaissances fondamentales pour résoudre des problèmes ayant une composante biologique. La discipline de la bioingénierie est ensuite définie comme l'application de toute discipline du génie à tout système mettant en jeu des molécules ou des cellules biologiques pour mieux comprendre des systèmes biologiques et des technologies pratiques (site Web du Massachusetts Institute of Technology – MIT –, 2002). Le domaine du génie biomédical allie l'approche de plusieurs disciplines de génie (y compris la bioingénierie) pour résoudre des problèmes dans les domaines de la médecine et de la santé. Plus précisément, un ingénieur tissulaire résout des problèmes touchant à la santé humaine en provoquant ou en aidant la régénération de tissus et d'organes.

▷ 2.0 Principes du génie tissulaire

Nous savons maintenant que le génie tissulaire fait partie du domaine du génie, mais qu'est-ce que le génie tissulaire exactement ? Selon la Pittsburgh Tissue Engineering Initiative (PTEI) (site Web de la PTEI, 2002):

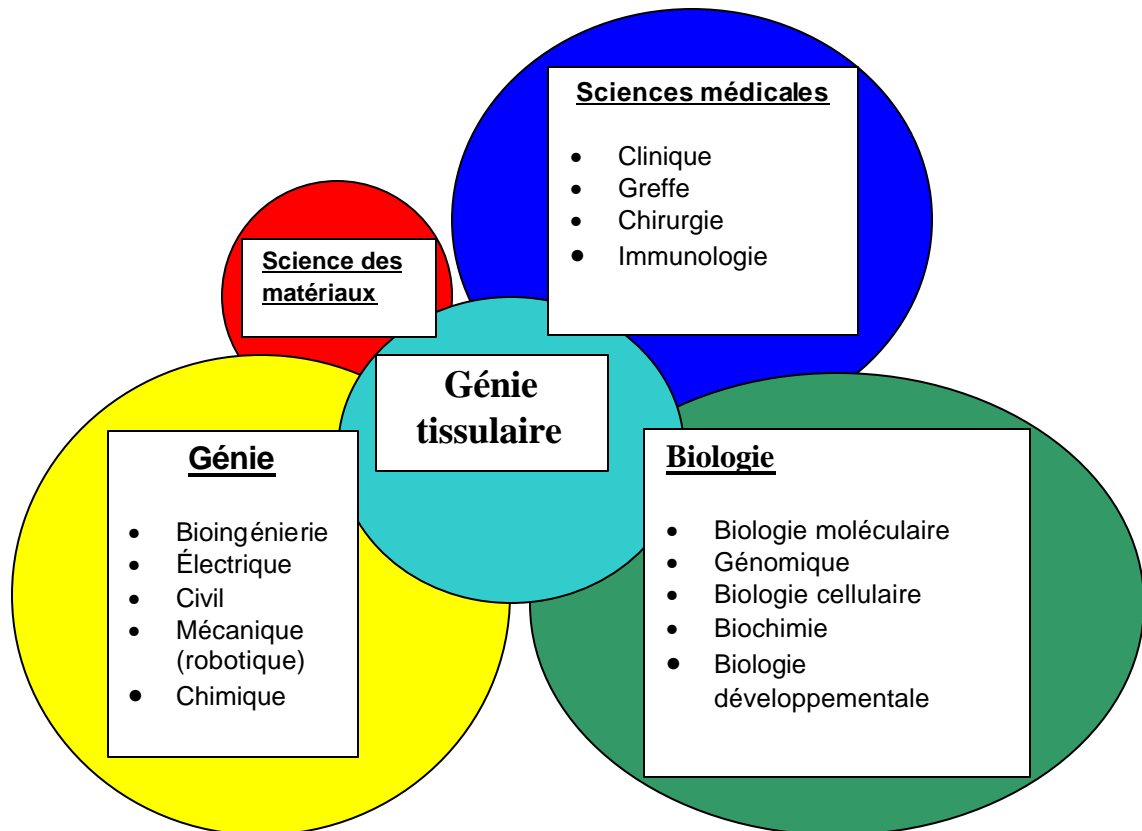
« En bref, le génie tissulaire est le développement et la manipulation de molécules, de cellules, de tissus ou d'organes conçus en laboratoire pour remplacer ou appuyer la fonction de parties du corps endommagées ou défectueuses. »

Selon cette définition, le rôle que les ingénieurs seraient appelés à jouer en génie tissulaire ne tombe pas sous le sens. Ce qui ira toutefois de soi, c'est que le génie tissulaire est un effort multidisciplinaire et collaboratif qui pourrait être déployé par les bio-ingénieurs et qui devra inclure des ingénieurs de plusieurs disciplines. La figure 2 illustre la nature interdisciplinaire du génie tissulaire. Les définitions de plusieurs termes biologiques sont présentées à l'annexe A. Le génie tissulaire est au carrefour du génie, de la science des matériaux, des sciences médicales et de la biologie. Les personnes qui travaillent dans chacun

de ces domaines jouent un rôle clé dans la conception d'une théorie ou d'un dispositif relevant du génie tissulaire.

Figure n° 2

La nature interdisciplinaire du génie tissulaire



Un récent article définit le génie tissulaire comme « ... des dispositifs ou des processus qui (1) allient des cellules vivantes et des biomatériaux; (2) utilisent des cellules vivantes comme réactifs thérapeutiques ou diagnostiques; (3) génèrent des tissus ou des organes *in vitro* pour transplantation subséquente; (4) fournissent les matériaux ou la technologie permettant de telles approches ».

(Lysaght et Reyes, 2001). Une définition plus vaste est donnée par les NIH (annexe A, tirée du site Web des NIH BECON, 2002).

Dans un sens général, les trois principaux éléments de tout assemblage de génie tissulaire sont :

1. Les cellules
2. Les signaux solubles
3. Les matériaux d'échafaudage

Ces trois éléments, avec un environnement mécanique approprié (« 4^e » élément), sont requis pour créer un assemblage par génie tissulaire. Les cellules et les matériaux d'échafaudage confèrent les propriétés structurelles et fonctionnelles au tissu, alors que les signaux solubles guident les actions des cellules. Dans le corps, ces signaux solubles circulent dans le sang et d'autres liquides organiques. Ils sont produits par des cellules. L'échafaudage est également construit et maintenu par les cellules. La combinaison correcte de ces quatre constituants est essentielle pour un tissu fonctionnel créé *in vivo* (dans le corps) ou *in vitro* (en laboratoire).

2.1 Exemple d'application technologique – Reconstitution d'os par génie tissulaire

Le rôle des différents domaines se trouvant à la figure 2 et les différents éléments énumérés à la section précédente peuvent être illustrés par un exemple : la reconstitution d'os par génie tissulaire. Il s'agit de fabriquer du tissu osseux ayant les caractéristiques requises sur les plans histologique (apparence de l'os) et fonctionnel (fonction de l'os). Le rôle que joue chacun des quatre domaines, soit le génie, la science des matériaux, la biologie et la médecine, sera brièvement expliqué.

La plupart des tissus de mammifère sont composés de cellules et d'une matrice extracellulaire. La matrice extracellulaire est formée d'importants complexes protéiques et glucidiques qui sont produits et maintenus par les cellules dans ces

tissus. Selon le type de tissu, il peut y avoir plus de cellules que de matrice (p. ex., tissu du foie) ou plus de matrice extracellulaire que de cellules (p. ex., tissu osseux). Le ratio des cellules par rapport à la matrice aide à définir le fonctionnement et la formation du tissu. La plupart des applications initiales du génie tissulaire portent sur les tissus structurels, comme le cartilage et les os dont la principale composante est la matrice extracellulaire. Le tissu osseux est composé de cellules et d'une matrice extracellulaire (constituée d'hydroxyapatite minérale et de fibres de collagène protéique). Les cellules ne représentent qu'un faible pourcentage du volume total du tissu, la matrice formant le reste du volume.

L'atteinte de l'objectif final, c'est-à-dire la reconstitution de tissu osseux entièrement fonctionnel, peut être répartie en trois étapes. Au cours de la première étape, il faut parfaitement comprendre ce qui se produit dans le corps, y compris la fonction tissulaire normale, l'apparition et la progression d'une blessure ou d'une maladie, et la réparation normale du tissu. Cette compréhension doit émaner à la fois du point de vue du génie et de la biologie. Par exemple, les ingénieurs chimistes, travaillant avec des biologistes, modéliseraient les interactions des facteurs de croissance et d'autres molécules stimulatrices sur la prolifération (augmentation du nombre) et la différenciation (acquisition de caractéristiques matures) des ostéocytes, des ostéoblastes et des ostéoclastes (toutes des cellules du tissu osseux). Les ingénieurs mécaniciens modéliseraient l'interaction des forces et des charges mécaniques sur les cellules et sur le tissu dans son ensemble. Des scientifiques en biologie cellulaire, en biologie moléculaire et en biochimie décriraient la croissance et le métabolisme des cellules, y compris l'absorption de substances nutritives et la production de déchets.

Au cours de la deuxième étape, il s'agit d'élaborer un dispositif ou un procédé pour reproduire ou aider le processus de régénération et de réparation soit dans le corps (*in vivo*), soit en laboratoire (*in vitro*). C'est à cette étape que les

ingénieurs, les scientifiques des matériaux et les biologistes joueront un rôle important. Il a été établi que le chargement mécanique des cellules lors de leur croissance dans une culture augmente la qualité et la quantité de matrice extracellulaire osseuse. Des ingénieurs de toutes les disciplines (figure 2) seront alors appelés à mettre au point des dispositifs pour cultiver des cellules dans de telles conditions. L'expertise de biologistes du développement est également essentielle à cette étape, puisque nous tentons de reconstituer le tissu d'une manière semblable à sa croissance naturelle (au stade embryonnaire, au stade fœtal et au stade adulte). Comme le tissu osseux est essentiellement constitué de matrice extracellulaire, les scientifiques des matériaux aideront à produire des matériaux d'échafaudage pour la croissance de cellules. Cet échafaudage remplira temporairement la fonction de los (structure de soutien) pendant que les cellules produiront leur propre matrice.

La dernière étape est celle où l'on met en œuvre le processus retenu dans un environnement clinique. Les scientifiques œuvrant dans le domaine de la médecine, y compris des chirurgiens et des immunologues, auraient le rôle le plus important à jouer à cette étape. Les ingénieurs seraient appelés à échelonner tout processus développé au cours de l'étape précédente. Pour traiter un seul patient, il faut suffisamment de cellules et d'échafaudage pour créer le tissu adéquat. Pour traiter tous les patients affligés, il faut suffisamment d'assemblages. Dans un cas comme dans l'autre, les processus doivent être reproductibles et échelonnables, ce qui représente une importante tâche d'ingénierie.

▷ 3.0 Le « génie » dans le génie tissulaire

Comme le montre la figure 2, les ingénieurs figurent parmi les spécialistes requis pour construire un assemblage de génie tissulaire réussi. Nous avons également vu, à la section précédente, certains des rôles que les ingénieurs peuvent jouer dans la fabrication d'os par génie tissulaire. Nous devons maintenant poser la

question suivante, dans un sens général : *Quel rôle les ingénieurs jouent-ils dans le domaine du génie tissulaire ?*

Les ingénieurs participeront au développement et à la conception d'assemblages de génie tissulaire. Plusieurs des problèmes rencontrés en génie tissulaire ne peuvent être résolus que par des ingénieurs. D'abord, l'approche de l'ingénieur à la résolution de problèmes diffère considérablement de l'approche hypothèse-essai-conclusion des professionnels formés en médecine et en sciences. Ensuite, l'étendue de leurs interventions différencie également les ingénieurs des scientifiques. En règle générale, les scientifiques développent des méthodes de culture de cellules à petite échelle (cultures entre cinq et 50 ml). Or, la culture de tissus et d'organes se fait à beaucoup plus grande échelle (entre 50 et 5 000 ml). Seuls les ingénieurs ont les aptitudes nécessaires pour faire face à toutes les difficultés qui surviennent à plus grande échelle. Ces difficultés comprennent les limites de transfert de masse, les systèmes de contrôle, les forces mécaniques, etc. Les ingénieurs possèdent aussi les compétences nécessaires pour établir les caractéristiques de matériaux et en analyser les propriétés (p. ex., effort/tension), et pour concevoir de nouvelles techniques de fabrication et de traitement. Les contributions de l'ingénierie peuvent aussi inclure l'élaboration de plans expérimentaux et la modélisation par ordinateur.

Le tableau 1 illustre le rôle des ingénieurs aux diverses échelles du génie tissulaire. Les échelles vont des molécules (nm), à la simple cellule (µm), aux tissus (mm-cm), au bioréacteurs (cm-dm) et à l'environnement clinique (m). Le tableau donne aussi les rôles des ingénieurs ainsi que quelques exemples. Les exemples illustrent l'application de principes de bioingénierie, du génie électrique, chimique et mécanique. La liste ne se veut pas exhaustive, mais indique les contributions que les ingénieurs peuvent apporter. Les ingénieurs ont beaucoup à offrir, même à la plus petite échelle. Pour qu'un tissu produit par génie tissulaire soit approuvé, il faut entre autres que sa reproductibilité ait été démontrée. L'habileté des ingénieurs à modéliser et à prédire le comportement

à toutes les échelles sera essentielle à la production d'assemblages de génie tissulaire en milieu clinique.

Tableau 1 – Rôle des ingénieurs en génie tissulaire

Échelle du génie tissulaire	Rôle de l'ingénieur	Exemple
TOUTES	Modélisation	Interactions à multivariabiles et conception expérimentale
	Imagerie	Conception de méthodes et d'instruments pour examiner des tissus, des cellules et des molécules
Moléculaire (nm)	Matériaux	Conception d'échafaudages polymériques
		Élaboration d'échafaudages pour fixer des cellules
Unicellulaire (μm)	Impact des forces mécaniques sur les cellules	Conception de techniques de traitement de polymères
	Modélisation	Réaction des cellules (p. ex., chondrocytes - cellules du tissu cartilagineux) aux forces mécaniques
Tissu (mm-cm)		Essais
	Interactions des molécules à l'intérieur des cellules (cinétique du facteur de croissance/interactions des récepteurs)	
	Analyse des contraintes (effort/tension)	Cinétique de la division cellulaire - mort, différenciation, adhésion et migration
		Suivi <i>in vivo</i> et <i>in vitro</i> du comportement de l'assemblage tissulaire
Impact des forces mécaniques sur les tissus	Analyse du comportement sous contrainte de tissus naturels et de tissus produits par génie cellulaire	
	Réaction des tissus (cellules et matrice extracellulaire) aux forces mécaniques	
Bioréacteur (cm-dm)	Modélisation	Transfert de molécules aux cellules à l'intérieur de tissus
		Transfert de chaleur et de masse lors de la cryoconservation et du dégel
Clinique (m)	Conception/optimisation de bioréacteurs	Mouvement des fluides <i>in vivo</i> (vaisseaux sanguins) et <i>in vitro</i> (échafaudages et bioréacteurs)
		Mouvement des substances nutritives et des déchets dans les tissus et les assemblages
	Matériaux	Fixe/culture en suspension/bioréacteurs à fibres creuses
Systèmes de contrôle		Foie et pancréas bioartificiels
Assurance de la qualité	Contrôle de la qualité	Techniques de traitement
		Bioréacteurs

▷ 4.0 L'exercice du génie tissulaire

Comme domaine de l'ingénierie, le génie tissulaire nécessitera des ingénieurs bien formés et compétents. La section suivante traite des programmes de premier cycle et de deuxième et troisième cycles de bioingénierie, de génie biomédical et de génie tissulaire accrédités dans les universités canadiennes et américaines. Vient ensuite une discussion sur l'état du domaine du génie tissulaire et sur le rôle des ingénieurs tissulaires au sein de ce secteur d'activité.

4.1 La formation en génie tissulaire

Au Canada, les programmes de génie sont accrédités par le Conseil canadien de ingénieurs (CCI). Trente-six universités offrent des programmes de génie accrédités au Canada. Bien qu'il n'y ait aucun programme de premier cycle en génie tissulaire au Canada, il y a dix programmes de bioingénierie (y compris le génie biomédical et le génie biochimique) de premier cycle (dont huit sont accrédités), et 11 universités offrant des programmes d'études supérieures en bioingénierie. De plus, des recherches individuelles ou de groupe sont effectuées dans le domaine du génie tissulaire dans 11 universités. L'annexe B dresse une liste complète des universités qui offrent des programmes accrédités au Canada, ainsi que leurs programmes de premier, deuxième et troisième cycles en bioingénierie. La liste énumère aussi les universités où des recherches en génie tissulaire sont menées (au sein de la faculté de génie).

Aux États-Unis, les programmes de génie sont accrédités par l'Accreditation Board for Engineering and Technology (ABET). En 2001, les États-Unis comptaient 348 universités offrant 1 627 programmes de génie accrédités, mais aucun programme accrédité en génie tissulaire. Parmi les universités offrant des programmes de génie accrédités, 15 ont des programmes en génie biomédical, 18 en bioingénierie (ou un domaine semblable), et sept en génie des biosystèmes (soit 40 universités en tout). La définition du génie des biosystèmes

se rapproche beaucoup de celle de la bioingénierie, mais se concentre davantage sur les applications agricoles et biotechnologiques.

La Whitaker Foundation donne des chiffres légèrement différents, mais certains programmes figurant sur sa liste peuvent ne pas être accrédités par l'ABET. Il y a 91 programmes ou départements de génie biomédical en Amérique du Nord. De ce nombre, 65 établissements possèdent des programmes de premier cycle menant à un B. Sc., 74 offrent un programme de maîtrise et 78 offrent un programme de doctorat (site Web de la Whitaker Foundation). Le nombre de programmes/départements de bioingénierie (B. Sc.) qui ont été établis au cours des dix dernières années (depuis 1992) s'élève à 39 sur 65 (60 %). Les autres 40 % ont été établis au cours des 30 années précédentes. On assiste donc à une croissance rapide du nombre de programmes offerts, et on ne prévoit pas de ralentissement dans un avenir rapproché.

D'autres statistiques sont également disponibles pour les États-Unis. Alors que le nombre d'inscriptions de premier cycle en génie est resté stable à 350 000 étudiants depuis 1979, les inscriptions aux programmes de premier cycle de bioingénierie sont passées de moins de 3 000 en 1979 à plus de 6 500 en 2000 (site Web de la Whitaker Foundation, 2002). La proportion d'étudiants de premier cycle en bioingénierie est passée de 0,86 % à 1,86 % du total des étudiants de premier cycle en bioingénierie. Le nombre d'étudiants diplômés en génie est passé de 41 000 en 1979 à 81 000 en 2000, alors que le nombre d'étudiants diplômés en bioingénierie a connu une augmentation entre 1979 et 2000, passant de 700 à 2 500. La proportion d'étudiants diplômés en bioingénierie est passée de 1,70 % à 3,09 % du total des étudiants de premier cycle en génie. Ces tendances devraient être semblables au Canada où les programmes de génie biomédical sont en demande.

Des statistiques récentes sont également disponibles sur les inscriptions en génie au Canada (CCI, 2002). En 2000, le nombre d'étudiants en génie au

premier cycle s'élevait à 48 600, alors qu'il n'y avait qu'un peu moins de 530 inscriptions aux programmes de premier cycle en bioingénierie (CCI, 2002). Les étudiants de premier cycle en bioingénierie représentent donc environ 1 % du nombre total d'étudiants de premier cycle en génie. Le nombre total d'étudiants de deuxième et troisième cycles en génie s'élevait à 10 200 en 2000, alors qu'en bioingénierie, ils n'étaient que 148. Les étudiants de deuxième et troisième cycles en bioingénierie représentent 1,45 % de tous les étudiants de deuxième et troisième cycles en génie. Il est important de noter que dans le rapport du CCI (2002), la bioingénierie est appelée génie des biosystèmes qui comprend la plupart des disciplines de bioingénierie mais qui ne comprend pas le génie biochimique. Il est également intéressant de souligner que le nombre d'étudiants inscrits à des programmes de bioingénierie de deuxième et troisième cycles ne reflète pas adéquatement le nombre d'étudiants qui font des recherches en bioingénierie (ainsi que ceux qui reçoivent une formation dans ce domaine). Ceci est dû au faible nombre de programmes accrédités de bioingénierie dans les universités canadiennes.

4.2 Le domaine du génie tissulaire

Compte tenu du petit nombre de programmes de génie tissulaire, que ce soit au niveau du premier ou des deuxième et troisième cycles, il est très difficile d'estimer le nombre d'ingénieurs qui travaillent en génie tissulaire. L'exercice du génie biomédical peut toutefois être quantifié par des données connues. Ces données peuvent fournir une idée de ce qui se fait et de ce qui se fera dans le domaine du génie tissulaire. Selon la Whitaker Foundation, le nombre d'ingénieurs biomédicaux employés aux États-Unis en 2001 s'élevait à 7 221. On prévoit que ce nombre augmentera de 31,4 %, pour s'établir à 9 487 d'ici 2010. Les trois plus importants secteurs (chacun comptant environ 18 % des ingénieurs biomédicaux) étaient 1) les hôpitaux publics et privés; 2) les entreprises de fournitures et d'instruments médicaux; 3) les travailleurs autonomes œuvrant principalement en génie biomédical (site Web de la Whitaker Foundation). Le premier et le troisième de ces secteurs requièrent tous

deux des ingénieurs tissulaires. Comme nous l'avons mentionné à la section précédente, il y a peu d'entreprises au Canada qui font de la recherche en génie tissulaire, et le nombre d'entreprises employant des ingénieurs biomédicaux (ou ingénieurs tissulaires) est très difficile à estimer. À l'heure actuelle, il n'y a pas de statistiques distinctes pour le secteur du génie biomédical pour le Canada.

Il existe toutefois des statistiques pour le secteur de la biotechnologie (qui comprend le génie biomédical). Dans un document publié récemment, le nombre d'entreprises biotechnologiques canadiennes a augmenté de 183 % entre 1997 et 2001, ce qui place le Canada en deuxième place au monde après les États-Unis (Ernst & Young, 2002). Durant la même période, la valeur en bourse du secteur biotechnologique est passée de huit à 20 milliards de dollars. Le domaine biotechnologique au Canada regroupe des secteurs qui emploieraient des ingénieurs biomédicaux en thérapeutique (57 % du nombre total d'entreprises), en analyse diagnostique (10 %) et en analyse diagnostique médicale (1 %). Au total, 270 entreprises au Canada œuvrent dans des domaines qui auraient recours à des ingénieurs biomédicaux.

L'enquête la plus récente du CCI (1998), dont le taux de réponse s'élevait à 25 %, fournit aussi certaines données sur le nombre de bio-ingénieurs exerçant au Canada. En 1997, 1 486 des 128 537 répondants (1,16 %) se considéraient comme des ingénieurs de biosystèmes (y compris des ingénieurs biomédicaux), alors que 124 (0,1 %) se considéraient comme ingénieurs biomédicaux. Parmi les ingénieurs biomédicaux, un peu plus de la moitié seulement détenaient un diplôme de premier cycle en génie biomédical. Ce faible nombre est dû au fait, comme nous l'avons mentionné précédemment, que la plupart des programmes de premier cycle en génie biomédical (60 %) n'ont été créés qu'au cours de dix dernières années. Les diplômés n'ont pas eu assez de temps pour acquérir suffisamment d'expérience afin d'être agréés par leur ordre ou par leur association professionnelle.

Un récent examen du secteur du génie tissulaire a dénombré 73 entreprises œuvrant dans le domaine du génie tissulaire (Lysaght et Reyes, 2001). Les États-Unis mènent le peloton dans la commercialisation de cette technologie avec 55 entreprises (75,4 %), suivis par l'Europe avec 17 entreprises (23,3 %). Une seule entreprise de génie tissulaire est située au Canada (1,3 %). Le tableau 2 résume les statistiques pour ce secteur (à travers le monde).

Tableau 2 – Le domaine du génie tissulaire (Lysaght et Reyes, 2001)

Nombre d'ingénieurs, de scientifiques et d'employés de soutien (1 ^{er} janv. 2000)	3 300
Dépenses annuelles (1 ^{er} janv. 2000–31 déc. 2000)	610 millions \$
Nombre d'entreprises (1 ^{er} janv. 2001)	73
Taux de croissance annuel composé (1995-2001)	16 %
Nombre de nouvelles entreprises (moyenne, 1990-2000)	4,4
Valeur en capital des entreprises après l'appel public initial (1 ^{er} janv. 2001) (n = 16)	2,6 milliards \$
Investissement cumulatif (1990-2001)	3,5 milliards \$

Le secteur connaît un taux de croissance régulier de 16 % depuis les cinq dernières années et le nombre de nouvelles entreprises créées tous les ans se situe entre trois et huit depuis la dernière décennie. Le domaine du génie tissulaire, par contraste avec d'autres domaines technologiques comme les sociétés point-com, connaît une croissance forte et soutenue depuis les cinq à dix dernières années, surtout en raison des différents secteurs du génie tissulaire. Le génie tissulaire se répartit en trois secteurs principaux : structurel (peau, os, vaisseaux sanguins), métabolique (organes bioartificiels, thérapie par cellules encapsulées) et cellulaire (traitement cellulaire, recherche sur les cellules souches, clonage thérapeutique). Chaque secteur connaît ses propres cycles de hauts et de bas qui tendent à s'équilibrer. À l'heure actuelle, les entreprises du secteur structurel emploient 60 % des employés, alors que les entreprises des secteurs cellulaire et métabolique en emploient 27 % et 11 %, respectivement.

respectivement. Il n'existe que deux produits de génie tissulaire approuvés par la Food and Drug Administration (FDA) sur le marché, soit Apligraph® (peau produite par génie cellulaire par la société américaine Organogenesis) et Carticel® (cartilage produit par la société américaine Genzyme Biosurgery). Les deux produits sont des produits structurels.

Le secteur du génie tissulaire devrait connaître un taux de croissance qui se situera entre 22 % et 50 % au cours de la prochaine décennie (Persidis, 2000; Koopman, 2001). Alors que le secteur du génie tissulaire est en plein essor aux États-Unis, les données canadiennes sont difficiles à obtenir. Selon le ratio du nombre de programmes universitaires en bioingénierie au Canada et aux États-Unis ($10/40 = 0,25$) et des populations des deux pays ($30 \times 10^6/300 \times 10^6 = 0,10$), on prévoit que ce secteur sera également florissant au Canada.

Une politique en matière de cellules souches est un autre facteur qui pourrait influencer la recherche et le secteur du génie tissulaire. À l'heure actuelle, les cellules souches (embryonnaires, fœtales et adultes) sont une importante composante de la recherche en génie tissulaire. Comme nous l'avons mentionné précédemment, les trois principaux éléments de tout assemblage de génie cellulaire sont : 1) les cellules, 2) les signaux solubles et 3) les matériaux d'échafaudage. En génie cellulaire, les cellules devront avoir un fort potentiel de développement et devront donc être des cellules souches dans plusieurs cas. La réglementation canadienne relative à l'utilisation de cellules souches étant beaucoup moins contraignante, plusieurs chercheurs américains pourraient être attirés au Canada.

4.3 Les aspects de l'ingénierie en génie tissulaire

Les ingénieurs titulaires d'un permis d'exercice qui travaillent en génie tissulaire devront suivre les mêmes normes de professionnalisme sur les plans de l'éthique, de la loi, de la déontologie et des devoirs de l'ingénieur envers la société et l'environnement.

Un ingénieur tissulaire qui veut faire carrière dans ce domaine, que ce soit au sein de ce secteur d'activité, en gestion ou en pratique privée, doit avoir démontré des compétences (en ce qui concerne la formation et l'expérience) en génie et en sciences biologiques/médicales. L'établissement du niveau de connaissances requis dans chaque domaine ne fait pas partie de la portée du présent rapport. En raison du petit nombre de programmes de premier cycle en génie tissulaire, cette évaluation peut se faire à l'aide de tests de compétences en sciences biologiques/médicales en plus du fait de posséder un diplôme universitaire de premier cycle en génie. Un rapport de Professional Engineers Ontario (PEO, 2001) recommande qu'un niveau de connaissances fondamentales soit établi en bioingénierie, en génie biochimique/alimentaire, en génie biomédical et en génie des bioressources, et que le comité provincial des exigences universitaires ait accès à cette information. Parmi ces connaissances fondamentales, certains sujets comme la biologie cellulaire, la bioéthique et les projets de conception en bioingénierie sont requis chez un ingénieur biomédical.

Comme le génie tissulaire est un domaine en croissance rapide, il sera important pour les ingénieurs tissulaires de maintenir leur niveau de compétences professionnelles par la formation continue, une formation en milieu de travail et un engagement envers l'éducation permanente.

La profession d'ingénieur tissulaire devra être réglementée par des personnes ayant une connaissance en génie tissulaire. Ces personnes devront appartenir aux organisations nationales (p. ex., CCI) ou provinciales (ordre ou associations) appropriées ou au moins être consultées par ces organisations.

Les principes de l'éthique en ingénierie s'appliquent tant aux ingénieurs tissulaires qu'à tous les autres ingénieurs. Il y a toutefois d'autres questions d'éthique qui sont propres à la bioéthique (éthique médicale) en raison du lien direct entre le génie tissulaire et le secteur de la santé. Des questions comme le

rapport qualité de vie/durée de vie, l'euthanasie, les coûts de santé, ainsi que le don et la propriété d'organes, de tissus et de cellules, requièrent un discours beaucoup plus approfondi que ce rapport peut offrir. Le lecteur est invité à consulter les sites Web des NIH, de l'*American Journal of Bioethics* et de la Société canadienne de bioéthique pour obtenir plus de renseignements et un excellent aperçu de la bioéthique. De plus, les conséquences de la non-observation des codes de l'exercice de la profession sont complexes. Par exemple, les conséquences d'erreurs dans les calculs d'un ingénieur tissulaire peuvent avoir des impacts directs sur la santé et le bien-être des personnes.

Les ingénieurs tissulaires, comme les ingénieurs qui exercent leur profession dans des secteurs plus traditionnels, devront également se préoccuper de questions comme la sécurité, la qualité et la fiabilité des produits. Un produit vivant sera cependant soumis à des spécifications et à des mesures de contrôle de la qualité beaucoup plus rigoureuses que les produits inertes (non biologiques) comme les bâtiments, les automobiles ou les produits chimiques non médicaux. Les produits du génie tissulaire sont actuellement réglementés par la FDA aux États-Unis sous la désignation TEMP (*Tissue Engineering Medical Products*). Lanza *et al.*, 2000, présente une discussion détaillée sur le rôle de la FDA en ce qui concerne : a) l'autorisation légale ; b) le processus d'évaluation et de réglementation des produits ; c) les développements récents en matière d'évaluation des produits ; d) l'établissement de normes ; e) les communications avec le secteur d'activité.

5.0 Mesures prises par la profession

Les ingénieurs ont un rôle clé à jouer dans le nouveau domaine du génie tissulaire. Cette section traite des mesures que la profession devrait prendre dans les domaines de l'éducation, de l'exercice de la profession, de la sensibilisation du public, du rôle du gouvernement et de la réglementation.

5.1 Éducation

Comme il n'y a pas de programme de « génie tissulaire » formel en Amérique du Nord, il est actuellement difficile d'agréer des ingénieurs dans ce domaine. Plusieurs universités à travers l'Amérique du Nord offrent toutefois des programmes de bioingénierie. Les ingénieurs qui exercent le génie tissulaire devraient être agréés à titre de bio-ingénieurs. Les bio-ingénieurs devraient posséder une formation et une expérience pertinentes en génie et en sciences biologiques/médicales, tout comme les ingénieurs tissulaires.

Un exemple devrait illustrer le dernier point ci-dessus. Un ingénieur chimiste qui veut exercer le génie chimique dans une industrie en particulier (p. ex., l'industrie pétrochimique) doit posséder une formation et une expérience pertinentes en génie chimique (et non en génie pétrochimique), compte tenu que le génie pétrochimique est considéré comme un sous-domaine du génie chimique et que les comités d'agrément n'examinent pas les demandes de désignation spécifiques. De la même manière, les ingénieurs tissulaires, dont la spécialité fait partie de la bioingénierie, doivent démontrer leurs compétences en bioingénierie (et non en génie tissulaire), y compris une formation et une expérience pertinentes.

Un autre point doit être soulevé en ce qui concerne la formation formelle des ingénieurs tissulaires. À l'heure actuelle, il pourrait être défavorable de limiter le nombre de personnes exerçant le génie tissulaire en exigeant un diplôme formel en bioingénierie. Le domaine évolue si rapidement que des contributions importantes peuvent encore être apportées par des personnes n'ayant qu'une formation formelle limitée en génie biomédical. Une expérience pertinente dans le domaine ou une formation postsecondaire appropriée devraient suffire jusqu'à ce que des programmes universitaires de premier cycle en génie tissulaire soient offerts.

5.2 Exercice de la profession (adhésion, réglementation)

Les ingénieurs tissulaires qui exercent le génie tissulaire restent des ingénieurs et devraient donc être soumis à la réglementation des organismes provinciaux régissant la profession d'ingénieur. Par contre, comme le montre la figure 2, plusieurs aspects du génie tissulaire requièrent l'apport de non-ingénieurs, dont des chirurgiens, des cliniciens, des biologistes cellulaires, des biochimistes et d'autres scientifiques. Il est bien évident que ces personnes ne sont pas soumises à la réglementation de la profession d'ingénieur.

C'est ici que survient une grande différence entre le génie tissulaire et les domaines du génie plus traditionnel. Par leur nature, les projets de génie tissulaire devront être réalisés par des équipes qui comprendront des ingénieurs et des non-ingénieurs.

À l'heure actuelle, tout projet d'ingénierie autre que le génie tissulaire (p. ex., conception d'une usine) et nécessitant l'intervention d'ingénieurs doit être réalisé sous la conduite d'un ingénieur détenant un permis. Cet ingénieur assume la responsabilité du projet en apposant son sceau sur les plans, devis, rapports et autres documents exigeant le travail d'un ingénieur (Andrews et Kemper, 1999). L'apposition du sceau signifie que l'ingénieur a préparé **ou** approuvé les documents. Si cette relation se maintient, tout travail de génie tissulaire serait réalisé sous la supervision d'un ingénieur titulaire d'un permis d'exercice. L'ingénieur tissulaire assumerait la responsabilité du projet selon les principes établis par l'organisme provincial régissant la profession d'ingénieur. D'ailleurs, tout projet faisant appel à « l'exercice de la profession d'ingénieur » devrait être réalisé sous la responsabilité d'un ingénieur.

Dans tous les cas, comme nous l'avons écrit précédemment, l'exercice de la profession d'ingénieur tissulaire devra être réglementé par des personnes ayant une connaissance du génie tissulaire. Les organismes provinciaux responsables de l'attribution des permis d'ingénieur seront toujours responsables de délivrer

les permis d'exercice aux ingénieurs biomédicaux et tissulaires. Une évaluation adéquate et exhaustive de la formation et de l'expérience des ingénieurs biomédicaux et tissulaires sera essentielle au maintien du statut de la profession.

5.3 Sensibilisation du public

La perception publique du génie biomédical dans son ensemble, et du génie tissulaire plus précisément, est encore en retard sur les connaissances des professionnels dans le domaine. Cette tendance devrait se poursuivre compte tenu du rythme rapide des découvertes dans ce domaine. La situation est même parfois exacerbée par les annonces fréquentes et médiatisées de percées médicales, notamment dans le domaine des cellules souches. Il est important pour les organismes de réglementation professionnelle d'éduquer leurs membres, les entreprises qui travaillent avec des ingénieurs tissulaires (santé, dispositifs médicaux, sociétés pharmaceutiques), les médias et le grand public sur la composante d'« ingénierie » dans le génie tissulaire. Le manque d'une telle éducation est l'un de plus grands obstacles à l'acceptation de la technologie du génie tissulaire par le grand public.

Le problème de perception publique est semblable à celui que le génie génétique a connu il y a dix ou 20 ans. Le génie génétique est défini comme « la manipulation de matériel génétique en laboratoire. Il comprend l'isolement, la duplication et la reproduction de gènes, la recombinaison de gènes ou de l'ADN d'autres espèces et le transfert de gènes d'une espèce à l'autre, contournant ainsi le processus reproductif » (site Web de Ifgene, 2002). Dans cette définition, le génie génétique n'a pas une grande affinité avec le génie traditionnel, mais la perception publique voulant que le génie génétique soit une discipline de l'ingénierie reste forte.

Il est important que le génie tissulaire, si ce terme continue d'être employé, soit perçu comme une vraie discipline de l'ingénierie, c'est-à-dire l'application de

principes mathématiques et scientifiques à la résolution de problèmes pratiques. Il est également essentiel que la responsabilité de projets de génie tissulaire soit confiée à des ingénieurs.

5.4 Rôle du gouvernement

Au Canada, les soins de santé sont régis par les gouvernements fédéral et provinciaux. Ainsi, le système de santé est financé par le Trésor public, mais les services sont fournis par le secteur privé (site Web de Santé Canada, 2002). Le gouvernement fédéral établit des politiques sur les questions d'importance nationale et transfère des fonds aux provinces pour appuyer le financement des soins de santé. Les gouvernements provinciaux participent à la planification, au financement et à l'évaluation des soins hospitaliers, des soins prodigués par les médecins et autres services de santé, ainsi qu'à la gestion et à la prestation de soins de santé (site Web de Santé Canada, 2002). En Alberta, avec la venue d'un régime de soins de santé public/privé, l'émergence d'entreprises offrant des services de génie tissulaire pourrait devancer l'offre de tels services par la province.

Il est évident, à la suite du débat sur les cellules souches et sur la réglementation en découlant imposée au Canada et aux États-Unis, que les politiques gouvernementales ont le pouvoir d'orienter le nouveau secteur du génie cellulaire. Le débat public sur l'utilisation de thérapies faisant appel au génie tissulaire dans les soins de santé courants se poursuivra vraisemblablement pendant plusieurs années. Le financement de recherches en génie tissulaire provient de sources publiques et privées. On prévoit que les gouvernements continueront de financer des recherches en génie tissulaire dans un avenir rapproché, mais vu l'énorme potentiel commercial du génie tissulaire, une importante partie des recherches est déjà financée par le secteur privé. L'acceptation de cette technologie pourrait toutefois être freinée par la réglementation et la perception du public, bien que les recherches initiales aient démontré que le génie tissulaire peut sauver des vies. Il n'est pas clair si le

gouvernement aura un rôle continu dans le secteur en expansion du génie tissulaire. Le rôle de la FDA aux États-Unis a déjà été remis en cause.

Lorsque le secteur du génie tissulaire aura atteint sa maturité, et que les thérapies faisant appel au génie tissulaire seront régulièrement employées pour traiter des blessures, la dégénérescence de tissus et la défaillance d'organes, le gouvernement aura pour rôle d'assurer la sécurité du public. Ce rôle pourrait chevaucher la compétence des organismes provinciaux responsables de la réglementation de l'exercice de la profession d'ingénieur. Les détails relatifs à la nature exacte de la relation entre les politiques fédérales en matière de santé, les politiques provinciales et les organismes de réglementation provinciaux restent encore à déterminer.

▷ 6.0 Conclusion

Le génie tissulaire est un domaine multidisciplinaire qui évolue rapidement et qui offre de nombreux défis et possibilités. Le génie tissulaire est un sous-domaine du génie biomédical qui est une application de principes de génie traditionnel et de bioingénierie. Le génie tissulaire se situe au carrefour des sciences biologiques, des sciences médicales, de la science des matériaux et de l'ingénierie. Comme les ingénieurs joueront un rôle important dans l'orientation du génie tissulaire, la profession d'ingénieur au Canada doit faire preuve d'initiative en ce qui a trait à la définition de son rôle au sein de ce nouveau secteur. À l'heure actuelle, la formation et l'accréditation en génie biomédical préparent le terrain pour des ingénieurs tissulaires bien formés. Le rôle de ces ingénieurs en tant que professionnels responsables de projets de génie tissulaire doit être bien justifié pour que le secteur du génie tissulaire soit réglementé par la profession d'ingénieur. De plus, la perception que le public, les ingénieurs d'autres domaines et ce secteur d'activité auront des ingénieurs tissulaires doit être modelée par les organismes provinciaux régissant la profession d'ingénieur

▷ 7.0 Références

1. *Accredited Engineering Programs*, 30 septembre 2001. Site Web de l'Accreditation Board for Engineering and Technology (ABET) : <http://www.abet.org/>, référence du 9 avril 2002.
2. Site Web de l' *American Journal of Bioethics* (AJOB), 2002 : <http://ajobonline.com/>, référence du 12 avril 2002.
3. Andrews, G. C., et Kemper, J. D., *Canadian Professional Engineering Practice and Ethics – 2nd Edition*, Toronto, Harcourt Brace and Company, 1999.
4. *Canadian Bioethics Links*. Site Web de la Canadian Bioethics Society, 2002 : <http://www.bioethics.ca>, référence du 12 avril 2002.
5. Conseil canadien des ingénieurs, *Sondage national de 1997 sur la profession d'ingénieur au Canada : Résumé des conclusions*, 1998. Une publication du Bureau canadien des ressources en génie (BCRG) du CCI.
6. Conseil canadien des ingénieurs, *Ingénieurs canadiens pour l'avenir : inscriptions en génie et diplômes décernés en 1996-2000 – Tendances*, 2000. Une publication du Bureau canadien des ressources en génie (BCRG) du CCI.
7. Ernst & Young, 2002. *Beyond Borders: The Canadian Biotechnology Report 2002*.
8. Site Web de Ifgene (International Forum for Genetic Engineering), 2002 : <http://www.anth.org/ifgene/>, référence du 4 avril 2002.
9. Site Web de Santé Canada, 2002 : <http://www.hc-sc.gc.ca/>, référence du 19 avril 2002.
10. Koopman, A., "Tissue Engineering Industry May Grow by 50%", *Genetic Engineering News* **21**(6), 15 mars 2001, p. 22, 25 et 61.
11. Lanza, R. P., Langer, R., & Vacanti, J., *Principles of Tissue Engineering (2nd Edition)*, San Diego, Academic Press, 2000.
12. Lysaght, M. J., et Reyes, J., "The Growth of Tissue Engineering" *Tissue Engineering* **7**(5), 2001, p. 485-493.

13. Site Web de la Massachusetts Institute of Technology (MIT) Biological Engineering Division, 2002 : <http://web.mit.edu/be/>, référence du 4 avril 2002.
14. McIntire, L., *et al.*, 2002. *WTEC Panel Report on Tissue Engineering Research*. Site Web des National Institutes of Health (NIH) : <http://www.wtec.org/te/final/>, référence du 4 avril 2002.
15. Site Web des National Institutes of Health Bioengineering Consortium (BECON), 2002 : <http://www.becon.nih.gov/becon.htm>, référence du 4 avril 2002.
16. Site Web des National Institutes of Health (NIH) (États-Unis) Bioethics Resources on the Web, 2002 : <http://www.nih.gov/sigs/bioethics/>, référence du 12 avril 2002.
17. Persidis, A., "Tissue Engineering", *Nature Biotechnology* **18**, Supplement, 2000, IT56-58.
18. Professional Engineers Ontario, *Final Report of the Bioengineering Sub-Group of the Engineering Disciplines Task Force (EDTG)*, 2001. Une publication de la EDTG de PEO.
19. Rawe, J., "What are the hottest jobs for the future?", *Time* **155**(21), 22 mai 2000, p. 72-73.

▶ 8.0 Annexes

8.1 Annexe A - Glossaire

Assemblage - produit de génie cellulaire contenant en règle générale des cellules, un échafaudage et des signaux solubles pour guider les actions des cellules.

Biochimie - étude de la structure et de la fonction de molécules biochimiques comme les protéines, les hydrates de carbone, les lipides et les acides nucléiques et de leur rôle dans les réactions se produisant à l'intérieur des cellules (molécules et réactions biochimiques).

Bioingénierie - application de tout principe d'ingénierie à tout système mettant en jeu des molécules et (ou) des cellules biologiques pour mieux comprendre des systèmes biologiques et des technologies pratiques (site Web du MIT, 2002).

Biologie cellulaire - étude de la vie des cellules.

Biologie développementale - étude de la croissance et du développement d'organismes à partir du stade unicellulaire jusqu'aux stades embryonnaire, fœtal et adulte.

Biologie moléculaire - étude des interactions des molécules biologiques et de leur rôle dans le fonctionnement des cellules, des tissus et des organes.

Biomatériau - tout matériau technologique (naturel ou synthétique) conçu pour interagir avec un tissu/organe/organisme en vue de contrôler, modifier, appuyer ou améliorer ses fonctions ou ses propriétés. Un biomatériau diffère d'un matériau biologique comme l'os, par exemple, qui est produit par un système biologique.

Génie biomédical - discipline qui fait progresser les connaissances en génie, en biologie et en médecine et qui améliore la santé humaine grâce à des activités interdisciplinaires qui intègrent les sciences de l'ingénierie aux sciences biomédicales et à la pratique clinique (site Web de la Whitaker Foundation, 2002).

Génie tissulaire – un rapport du World Technology Evaluation Center

commandité par les NIH a récemment défini le génie tissulaire comme suit :

« ... application de principes et de méthodes d'ingénierie et de sciences de la vie en vue d'une compréhension fondamentale des relations structure-fonction dans les tissus normaux et pathologiques de mammifères, et le développement de substituts biologiques pour restaurer, maintenir ou améliorer la fonction tissulaire. Parfois également appelé médecine réparatrice ou régénérative, le génie tissulaire est un nouveau domaine interdisciplinaire de recherche et de technologie qui offre le potentiel de révolutionner les méthodes de traitement en soins de santé et d'améliorer grandement la qualité de vie de millions de personnes partout dans le monde. Certains produits sont déjà employés en milieu clinique et leur nombre va assurément s'accroître rapidement dans l'avenir. » (McIntire *et al.*, 2002)

Génomique - étude du rôle des gènes.

Histologie - étude de l'apparence des cellules, des tissus et des organes.

Immunologie - étude du système immunitaire humain, y compris les défenses non spécifiques (peau, globules blancs, fièvre, complément) et spécifiques (lymphocytes C, lymphocytes B, anticorps).

Ingénierie/génie - l'Association of Professional Engineers, Geologists and Geophysicists of Alberta définit l'exercice de la profession d'ingénieur comme suit :

(i) l'ingénieur prépare des rapports, conseille, évalue, conçoit, et prépare des plans et devis pour la réalisation ou la gestion de travaux de construction, d'inspections techniques ou de l'entretien et de l'exploitation de tout ouvrage, construction ou procédé

(A) qui vise la découverte, le développement ou l'utilisation de matières, de matériaux ou d'énergie ou qui est de toute autre manière conçu pour l'usage et la commodité de l'être humain, et

(B) qui requiert, pour préparer des rapports, conseiller, évaluer, concevoir ou gérer des travaux, l'application professionnelle de principes mathématiques, de chimie, de physique ou de tout autre sujet appliqué connexe;

(ii) l'enseignement du génie dans une université.

In vitro - en laboratoire (à l'extérieur du corps, strictement *ex vivo*).

In vivo - à l'intérieur du corps.

Organe - organisation de tissus en un ensemble structurel et fonctionnel. Par exemple, le foie est composé de tissu épithélial (principalement des hépatocytes (cellules du foie) et de cellules endothéliales (vaisseaux sanguins) et de tissu conjonctif (cellules de soutien des cellules hépatiques et des globules blancs circulants). Les organes font partie de systèmes d'organes (p. ex., système digestif) dans les organismes.

Sciences biologiques - étude scientifique de la biologie (organismes vivants).

Sciences médicales - étude de la science relative à la santé humaine.

Tissu - organisation de cellules en une unité structurelle et fonctionnelle. Les corps de mammifères comportent quatre types de tissus : le tissu épithélial (p. ex., peau et intestins), le tissu neural (neurones), le tissu musculaire (muscle squelettique, muscle stomacal, muscle cardiaque) et le tissu conjonctif (sang, tissus adipeux, tendons, ligaments, os, cartilage). Les tissus sont organisés en organes.

8.2 Annexe B – Programmes de bioingénierie dans les universités canadiennes offrant des programmes d'ingénierie accrédités

Université	Programme de premier cycle	Programmes de deuxième et troisième cycles	Recherche en génie tissulaire	Sites Web
Carleton University	S/O	S/O	Non	http://www.eng.carleton.ca/
Concordia University	S/O	S/O	Non	http://www.concordia.ca/
Dalhousie University/Technical University of Nova Scotia (DalTech)	Bioingénierie	Bioingénierie, génie biomédical	Oui – 1,3	http://www.dal.ca/~engwww/index.htm
École de technologie supérieure	S/O	S/O	Non	http://www.etsmtl.ca/
École Polytechnique	Génie biomédical [#]	Génie biomédical	Oui – 1,3	http://www.polymtl.ca/departement/dep/bio medic.php
Lakehead University	S/O	S/O	Non	http://www.lakeheadu.ca/~engwww/
Laurentian University	S/O	S/O	Non	http://www.laurentian.ca/index_f.asp
McGill University	Génie agricole	Génie biomédical	Oui – 1,3	http://www.mcgill.ca/engineering/
McMaster University	S/O	S/O	Oui – 1,3	http://www.eng.mcmaster.ca/
Memorial University of Newfoundland	S/O	S/O	Non	http://www.engr.mun.ca/
Queen's University	S/O	S/O	Oui – 1,2	http://info.queensu.ca/
Royal Military College of Canada	S/O	S/O	Non	http://www.rmc.ca/
Ryerson Polytechnic University	S/O	S/O	Non	http://www.acs.ryerson.ca/
Simon Fraser University	Mineure en génie biomédical	S/O	Non	http://www.ensc.sfu.ca/
Université de Moncton	S/O	S/O	Non	http://www.umoncton.ca/udem/index.html
Université de Sherbrooke	S/O	S/O	Non	http://www.usherb.ca/sca/
Université du Québec à Chicoutimi	S/O	S/O	Non	http://www.uqac.quebec.ca/
Université du Québec à Trois-Rivières	S/O	S/O	Non	http://www.uqtr.ca/Departement/ecoleIng.shtml
Université Laval	S/O	S/O	Non	http://www.fsg.ulaval.ca/index.htm
University of Alberta	S/O	Génie biomédical e (avec l'U of C)	Oui – 1,3	http://www.engineering.ualberta.ca/
University of British Columbia	Génie des bio-ressources (Bioingénierie)	Génie des bio-ressources (Bioingénierie)	Oui – 1,2,4	http://www.apsc.ubc.ca/engineering/
University of Calgary	S/O	Génie biomédical (avec l'U of A)	Oui – 2,4	http://www.eng.ucalgary.ca/
University of Guelph	Bioingénierie	Bioingénierie	Non	http://www.eos.uoguelph.ca/index.html
University of Manitoba	Génie des bio-systèmes	Génie des bio-systèmes	Non	http://www.umanitoba.ca/faculties/engineering/
University of New Brunswick	S/O	S/O	Non	http://www.unb.ca/
Université d'Ottawa	Biotechnologie (Génie chimique +Biochimie) [#]	S/O	Oui - 2	http://www.uottawa.ca/bienvenue.html
University of Regina	S/O	S/O	Non	http://www.uregina.ca/engg/
University of Saskatchewan	Génie agricole et des bioressources	Génie agricole et des bioressources	Non	http://www.usask.ca/communications/faq6.html
University of Toronto	S/O	Génie biomédical	Oui – 1,2,3,4	http://www.ecf.toronto.edu/apsc/ http://www.utoronto.ca/IBBME/
University of Victoria	S/O	S/O	Non	http://www.engr.uvic.ca/
University of Waterloo	S/O	S/O	Non	http://www.eng.uwaterloo.ca/

Université	Programme de premier cycle	Programmes de deuxième et troisième cycles	Recherche en génie tissulaire *	Sites Web
University of Western Ontario	Génie chimique et biochimique	Génie biomédical, chimique et biochimique	Oui - 1	http://www.engga.uwo.ca/
University of Windsor	S/O	S/O	Non	http://athena.uwindsor.ca/units/eng/EnginSplash.nsf/Engineering+main+page?OpenForm
Total des universités - bioingénierie	10 (8 accrédités)	11	11	-

Notes : (*) Domaines de recherche : 1 – Biomatériaux 2 – Modélisation 3 – Génie tissulaire 4 – Cellules souches
 (#) Programme de premier cycle non accrédité par le CCI (30 juin 2002)