

كلية الطب والصيدلة وطب الأسنان  
FACULTÉ DE MÉDECINE, DE PHARMACIE ET DE MÉDECINE DENTAIRE



جامعة سيدي محمد بن عبد الله - فاس  
UNIVERSITÉ SIDI MOHAMED BEN ABDELLAH DE FES

Année 2025

Thèse N°055/25

# ANATOMIE CHIRURGICALE DE LA PROSTATE

THÈSE

PRÉSENTÉE ET SOUTENUE PUBLIQUEMENT LE 10/02/2025

PAR

Mr. CHARKI Yassine

Né le 16 Janvier 1998 à Meknès

POUR L'OBTENTION DU DOCTORAT EN MÉDECINE

JURY

M. MELLAS SOUFIANE ..... PRÉSIDENT

Professeur d'Anatomie

M. EL ANZAQUI JIHAD..... RAPPORTEUR

Professeur d'Urologie

M. EL BAHRI ABDESSAMAD.....

Professeur d'Urologie

M. AHSAINI MUSTAPHA .....

Professeur d'Urologie

M. SINAA MOHAMED .....

Professeur d'Anatomie pathologique

JUGES

# PLAN

## SOMMAIRE

INTRODUCTION .....	23
HISTOIRE DE L'ANATOMIE DE LA PROSTATE .....	27
ORGANOGENESE DE LA PROSTATE .....	41
I. Introduction:.....	42
II. Initiation de la Prostate: .....	43
1. Origine et Développement Embryonnaire :.....	43
1.1 Formation du Sinus Urogénital:.....	43
1.2 Rôle des Androgènes et des Hormones :.....	46
1.3 Formation des Bourgeons Prostatiques : .....	47
1.4 Interactions Épithélium-Mésenchyme : .....	48
1.5 Premières Étapes de Ramification : .....	48
III. Cytodifférenciation et Canalisation: .....	50
1. La cytodifférenciation:.....	50
2. Canalisation: Formation des Lumières: .....	52
3. Rôle des Androgènes et des Signaux Moléculaires :.....	52
4. Importance de la Cytodifférenciation et de la Canalisation : .....	52
IV. Conclusion: .....	53
PHYSIOLOGIE DE LA PROSTATE .....	55
I. Introduction:.....	56

---

II. Régulation hormonale de la prostate .....	56
1. Rôle des androgènes dans la croissance et la fonction prostatique :....	57
2. Axe endocrinien : contrôle hypothalamo–hypophyso–testiculaire :.....	58
3. Interaction avec d'autres hormones: .....	59
3.1. Rôle des œstrogènes dans la régulation prostatique : .....	59
3.2. Synergie entre les œstrogènes et les androgènes : .....	60
III. Les sécrétions prostatiques et leurs fonctions .....	61
1. Composition du fluide prostatique: .....	62
2. Rôle fonctionnel des sécrétions prostatiques : .....	62
3. Régulation de la sécrétion : .....	63
IV. Facteurs influençant la croissance de la prostate : .....	63
1. Facteurs hormonaux : .....	64
2. Facteurs de croissance : .....	64
3. Facteurs environnementaux et génétiques : .....	65
4. Effets combinés des facteurs : .....	65
V. Aspects physiopathologiques de la prostate : .....	66
1. Hypertrophie bénigne de la prostate (HBP) .....	66
2. Cancer de la prostate : .....	67
3. Facteurs de risque et prédispositions : .....	68
4. Développement de la résistance hormonale : .....	68

---

5. Impact clinique et prise en charge :.....	69
EXPLORATIONS.....	71
I. PSA .....	72
1. Introduction : .....	72
2. Histoire du PSA :.....	72
3. Structure du PSA :.....	76
4. Fonction du PSA :.....	77
5. Utilisation Clinique du PSA :.....	78
5.1. PSA comme outil de dépistage : .....	78
6. Avantages et limites du PSA :.....	81
7. Problèmes et Défis dans l'utilisation du PSA :.....	83
7.1. Manque de spécificité du PSA :.....	84
7.2. Faux négatifs et limitations dans la détection :.....	85
8. Optimisation des stratégies d'utilisation du PSA :.....	86
9. Nouvelles Approches et Biomarqueurs Complémentaires :.....	88
9.1. Optimisation des technologies de dépistage :.....	88
9.2. Nouveaux biomarqueurs complémentaires :.....	90
10. Conclusion : .....	91
II. Le toucher rectal.....	92
1. Introduction : .....	92

---

2. Utilité clinique du toucher rectal : .....	93
3. Le rôle pronostique du toucher rectal dans le cancer de la prostate : ....	94
4. Limitations et défis du toucher rectal : .....	94
III. L'échographie .....	95
1. Introduction : .....	95
2. Bases de l'échographie transrectale (TRUS) : .....	96
3. Techniques avancées en échographie prostatique : .....	99
3.1. Échographie Doppler couleur et Échographie avec contraste (CEUS) : .....	99
3.2. Élastographie en temps réel : .....	102
3.2.1 Principe de l'élastographie en temps réel : .....	102
3.2.2. Avantages et limites : .....	103
3.2.3. Perspectives futures : .....	105
4. Innovations récentes : l'échographie haute résolution (micro- échographie) : .....	106
4.1 Présentation de la technologie : .....	106
4.2 Comparaison avec l'IRM multiparamétrique : .....	106
5. Conclusion : .....	107
IV. L'imagerie par Résonance Magnétique (IRM) .....	108
2.1 Imagerie Pondérée en T2 : .....	110

---

2.2 Imagerie par Diffusion (DWI) : .....	111
2.3 Imagerie Dynamique avec Injection de Contraste (DCEI) :.....	112
2.4 Utilisation Complémentaire des Séquences :.....	114
3. Système PI-RADS v2.1 et son rôle dans l'imagerie de la prostate : .....	115
4. IRM et Cancer de la Prostate :.....	118
4.1 Prévention et Diagnostic Précoce :.....	118
4.2 Avantages de l'IRMmp par rapport aux Méthodes Traditionnelles : .....	119
4.3 L'IRM dans la Gestion et le Suivi des Cancers de la Prostate : .....	119
4.3.1 Utilisation dans la Surveillance active :.....	119
4.3.2 Suivi post traitement : .....	119
4.3.3 Impact de l'IRM sur les Décisions Chirurgicales :.....	120
5. Limitations de l'IRM : .....	121
6. L'Utilisation de l'Intelligence Artificielle dans l'Imagerie de la Prostate : Une Solution Potentielle :.....	123
6.1. Modèles d'intelligence artificielle pour l'interprétation de l'IRM : ...	124
6.1.1 U-Net : .....	124
6.1.2 Radiomics :.....	127
6.1.2.1 Principe des Radiomics :.....	128
6.1.2.2. Applications des Radiomics dans l'IRM Prostatique :.....	128
6.1.2.3 Limites Actuelles des Radiomics : .....	129

---

6.2. Limites de l'IA dans l'IRM Prostatique :.....	129
6.3. Potentiel Futur de l'IA dans l'IRM Prostatique : .....	130
6.3.1. Amélioration Continue des Algorithmes :.....	130
7. Conclusion : .....	131
L'ANATOMIE CHIRURGICALE DE LA PROSTATE .....	132
I. Anatomie macroscopique de la prostate :.....	133
1. Morphologie et dimensions :.....	133
2. Variations Anatomiques de l'Apex Prostatique :.....	134
II. Relations avec les structures adjacentes :.....	138
1. Les vésicules séminales :.....	138
2. La vessie :.....	139
3. L'éperon détrusorien :.....	140
4. Les ligaments puboprostatiques :.....	142
III. L'anatomie chirurgicale du sphincter urétral, ses composantes, sa structure et son rôle :.....	148
1. Introduction :.....	148
2. Anatomie et structure du sphincter urétral .....	148
3. Rôle fonctionnel du sphincter urétral :.....	150
IV. Anatomie zonale de la prostate :.....	152
1. Origines de l'anatomie zonale :.....	152

---

2. Zone périphérique (ZP) :.....	155
3. Zone centrale (ZC) :.....	156
4. Zone de transition (ZT) :.....	157
5. Stroma fibromusculaire antérieur (SFMA) :.....	159
V. L'anatomie fasciale : .....	160
1. Introduction :.....	160
2. Le Fascia Pelvien Pariétal (FPP) :.....	161
3. Fascia Prostatique :.....	163
4. Le Fascia de Denonvilliers : .....	165
5. Capsule prostatique :.....	168
6. Implications Chirurgicales des Fascias Prostatiques : .....	170
VI. Vascularisation de la Prostate : Artères, Plexus Veineux Dorsal et Artère Pudendale Accessoire : .....	171
1. Vascularisation artérielle :.....	171
1.1. Les principales sources artérielles de la prostate : .....	171
1.2. L'origine des artères prostatiques : .....	176
1.3. Variabilité et anastomoses artérielles : .....	178
1.4. Vascularisation Intraprostatique : Anatomie et Microangiologie de la Prostate :.....	179
2. Les artères pudendales accessoires : .....	181

---

2.1. Rôle des artères pudendales accessoires : .....	181
2.2. Origine et Anatomie :.....	185
3. Le complexe vasculaire dorsal (plexus de Santorini) :.....	189
VII. Structures nerveuses et préservation des fonctions :.....	192
1. Le plexus pelvien : .....	192
2. Faisceau neurovasculaire (NVB) : .....	196
TECHNIQUES CHIRURGICALES .....	207
I. La prostatectomie périnéale .....	208
1. Développement de la prostatectomie périnéale : .....	208
1.1. La technique de Young :.....	208
1.2. La technique de Belt :.....	214
1.3. L'introduction de la technique de préservation nerveuse dans la prostatectomie par voie périnéale : .....	217
2. Avantages, Limites et Indications : .....	219
II. La prostatectomie rétropubienne : .....	220
1. Développement de la prostatectomie rétropubienne :.....	220
2. Technique de prostatectomie radicale rétropubienne ouverte avec préservation intrafasciale des nerfs :.....	223
2.1. Résultats :.....	225
2.2. Comparaison entre PRR et PRP :.....	225

---

III. La Laparoscopie en Chirurgie de la Prostate : .....	226
1. Introduction : .....	226
2. Histoire de la Laparoscopie en Chirurgie de la Prostate : Les débuts de la laparoscopie :.....	227
3. Technique de la Prostatectomie Radicale Laparoscopique « Nerve-Sparing » :.....	229
3.1. Introduction :.....	229
3.2. Préparation et Accès : .....	230
3.3. Exposition du Fascia Endopelvien :.....	230
3.4. Dissection du col vésical : .....	231
3.5. Dissection des Vésicules Séminales et des Pédicules Prostatiques :	232
3.6. Préservation des Faisceaux Neurovasculaires (FNV) :.....	232
3.7. Dissection Apicale et Contrôle du Complexe Veineux Dorsal (CVD) : .....	233
3.8. Anastomose Uréthro-Vésicale :.....	233
4. Les avancées majeures en chirurgie laparoscopique en urologie :.....	233
4.1. Améliorations des technologies vidéo : .....	233
4.2. Dispositifs chirurgicaux avancés : .....	234
4.3. Chirurgie à site unique et mini-laparoscopie :.....	235
5. Conclusion : .....	235

---

IV. La Chirurgie Robotique en Prostatectomie : Avancées, Techniques et Perspectives .....	236
1. Introduction : .....	236
2. Les premières étapes et l'introduction de la robotique en chirurgie :...	237
3. Transition des Techniques Traditionnelles vers la PRAR :.....	242
4. Avantages et Limites de la PRAR :.....	244
5. Technique Chirurgicale : VIP .....	245
6. Perspectives Futures : .....	248
7. Conclusion : .....	250
V. RTUP .....	251
1. RTUP : Une Révolution dans le Traitement de l'HBP et des Symptômes du Bas Appareil Urinaire (LUTS) :.....	251
2. Principe de la RTUP : .....	255
2.1. Principe de la Technique Monopolaire :.....	255
2.2. Principe de la Technique Bipolaire : .....	256
3. Avantages des deux techniques : .....	257
3.1. Avantages de la Technique Monopolaire :.....	257
3.2. Avantages de la Technique Bipolaire :.....	257
4. Techniques Chirurgicales de la Résection Transurétrale de la Prostate (RTUP) : .....	258

---

5. Résultats à Long Terme et Complications : .....	264
5.1. Résultats à Long Terme : .....	264
5.2. Complications : .....	264
6. Incision Transurétrale de la Prostate (TUIP) : .....	265
6.1. Aspects Techniques : .....	265
6.2. Technique Chirurgicale : .....	266
6.3. Comparaison avec la RTUP : .....	266
6.4. Avantages : .....	267
VI. Énucléation de la prostate au laser Holmium (HoLEP).....	268
1. L'Histoire de l'HOLEP : Évolution et Contributions au Traitement de l'HBP : .....	268
2. Techniques de l'HoLEP : .....	270
2.1. Introduction : .....	270
2.2. Technique Classique en Trois Lobes : .....	272
2.3. Technique Modifiée en Deux Lobes : .....	279
2.3.1. Technique : .....	279
2.3.2. Avantages et Limitations : .....	280
2.4. Technique en Bloc : .....	280
2.5. Technique en Bloc Sans Contact : .....	282

---

2.6. Techniques Spécialisées : Préservation du Col Vésical « Bladder Neck Sparing » : .....	283
2.6.1. Description de la Technique : .....	283
2.6.2. Résultats et Avantages :.....	284
2.6.3. Limitations : .....	285
3. Morcellation des Tissus :.....	285
4. Résultats Cliniques, Rentabilité, Complications et Adoption :.....	287
4.1. Avantages Cliniques et Résultats de l'HoLEP :.....	287
4.2. Complications : .....	288
4.3. Rentabilité : .....	289
5. Conclusion : .....	289
RESUMES .....	290
REFERENCES .....	294

## LISTE DES FIGURES

Figure 1:Hérophile.....	28
Figure 2:Dissection réalisée par Hérophile. ....	29
Figure 3:Claude Galien .....	30
Figure 4:Portrait de Leonardo da Vinci. ....	31
Figure 5:Les représentations de l'appareil urogénital par Léonard de Vinci .....	32
Figure 6:Niccolò Massa.....	33
Figure 7:Portrait de André Vésale (1514 – 1564).....	34
Figure 8:Dessin d'André Vésale montrant les organes urogénitaux .....	35
Figure 9:Caspar Bartholin le Vieux .....	36
Figure 10:Jacob B. Winslow (1669–1760) .....	37
Figure 11:William Cheselden (1688–1752).....	39
Figure 12:Patrick C. Walsh, MD .....	40
Figure 13:Aspect du cloaque (4ème semaine) .....	44
Figure 14:Division du cloaque par le SUR (6ème semaine) .....	44
Figure 15:Formation du SUG (8ème semaine) .....	45
Figure 16:L'épithélium du sinus urogénital bourgeonne dans le mésenchyme environnant.....	48
Figure 17:Ramification des bourgeons prostatiques .....	49
Figure 18:Les différents types de cellules issues du processus de cytodifférenciation. ....	51
Figure 19:Conversion de la testostérone en dihydrotestostérone (DHT). ....	57
Figure 20:Synergie entre les œstrogènes et les androgènes.....	61

Figure 21:Interaction entre la dihydrotestostérone (DHT) et les œstrogènes ...	68
Figure 22: Inhibition de la transformation de la testostérone en DHT .....	70
Figure 23:Ratio PSA libre/PSA total .....	78
Figure 24:Intervalle de référence du PSA en fonction de l'âge .....	79
Figure 25:La distribution anatomique des métastases montrée par le niveau de l'antigène spécifique de la prostate (PSA) lors du staging primaire.....	80
Figure 26:Causes d'élévation du PSA.....	82
Figure 27:L'échographie transrectale .....	97
Figure 28:Produits de contraste pour CEUS Levovist et SonoVue .....	101
Figure 29:Vue latérale de la prostate et des structures adjacentes .....	134
Figure 30:Recouvrement de l'apex par le sphincter .....	135
Figure 31:Les différents types de chevauchements .....	137
Figure 32:Vésicules séminales et leurs orifices urétraux.....	138
Figure 33:Schématisation de l'éperon détrusorien.....	141
Figure 34:Les mesures moyennes des ligaments puboprostatique.....	142
Figure 35:Ligaments puboprostatiques en forme de I.....	143
Figure 36:Ligament puboprostatique en forme $\lambda$ (lambda) .....	144
Figure 37:Schématisation de l'hypothèse du hamac.....	145
Figure 38:Coupe sagittale montrant la région rétropubienne et le plan de dissection dans la prostatectomie rétropubienne (Flèche rouge).....	146
Figure 39:Le complexe sphinctérien urétral selon Mamdouh M. Koraitim.....	149
Figure 40:Coupe axiale de l'urètre sphinctérien .....	150

Figure 41:Vue sagittale d'un modèle en cire de la prostate d'un nourrisson. Agrandissement x14. ....	152
Figure 42:Coupe transversale de la prostate montrant les lobes prostatiques	154
Figure 43:Anatomie zonale de la prostate selon Mcneal .....	155
Figure 44:Coupe transversale montrant l'anatomie zonale de la prostate.....	158
Figure 45:Coupe transverse montrant les structures fasciales distinctes entourant la prostate.....	161
Figure 46:Charles–Pierre Denonvilliers.....	165
Figure 47:Principe de la technique UroLift.....	169
Figure 48:Les différents plans de dissection.....	170
Figure 49:Branche antéro–latérale (1) / Branche postéro–latérale (2) ainsi que les zones qu'elles irriguent.....	176
Figure 50: Les différentes origines de l'artère prostatique. ....	177
Figure 51:Microangiogrammes de la prostate montrant : .....	180
Figure 52:Artère pudendale accessoire .....	182
Figure 53:APA latérale gauche (A) située au–dessus du fascia endopelvien (E) et à quelques millimètres latéralement de la prostate (P).....	186
Figure 54:APA apicale gauche (A) émergente à travers les fibres de l'élévateur de l'anus (L), près de l'apex de la prostate (P).....	188
Figure 55:Le complexe vasculaire dorsal.....	190
Figure 56:origines du plexus pelvien: .....	193
Figure 57:Dr Walsh.....	196
Figure 58:Plexus pelvien : origine et branches .....	197

Figure 59:Coupe montrant le faisceau neurovasculaire.....	200
Figure 60:Coupe en montage complet de la prostate.....	202
Figure 61:La distribution des nerfs parasymphatiques selon Ganzer et al. ....	203
Figure 62:La distribution des nerfs sympathiques selon Ganzer et al. ....	204
Figure 63:Dr Hugh Hampton Young .....	208
Figure 64:Le rétracteur de Young.....	210
Figure 65:Dr. Elmer Belt.....	214
Figure 66:technique de Belt .....	215
Figure 67:Les voies d'abord des techniques de Young et de Belt.....	216
Figure 68:la technique de préservation nerveuse dans la prostatectomie par voie périnéale.....	218
Figure 69:Dr Terence Millin .....	220
Figure 70:Dr. Georg Kelling .....	228
Figure 71:Dissection du col vésical .....	231
Figure 72:Endo Stitch™.....	234
Figure 73:Programmable Universal Machine for Assembly (PUMA® 200) .....	237
Figure 74:Robot médical AESOP d'Intuitive Surgical. ....	239
Figure 75:Composantes du robot ZEUS .....	240
Figure 76:Composantes du robot DA VINCI (1999).....	241
Figure 77:Composantes du Système DA VINCI.....	243
Figure 78:Plan de dissection du voile d'Aphrodite .....	247
Figure 79:Anastomose uréthro-vésicale.....	248
Figure 80:Dr Youness Ahallal.....	249

---

Figure 81:Prostatectomie robotisée réalisée sur un patient à Casablanca par le docteur Ahallal Youness en Chine.....	250
Figure 82:Dr. Maximilian Stern .....	253
Figure 83:Résectoscope bipolaire .....	256
Figure 84:Position lithotomique modifiée.....	259
Figure 85:Instruments nécessaires.....	260
Figure 86:Les techniques de BARNES et de NESBIT.....	262
Figure 87:Hémostase réalisée par coagulation des vaisseaux .....	263
Figure 88:Matériel utilisé dans l'HOLEP. ....	271
Figure 89:Incisions au niveau de l'urètre à 5 heures et 7 heures. ....	272
Figure 90:Incision Horizontale .....	274
Figure 91:Énucléation ascendante des deux lobes latéraux en crosse de hockey. .....	275
Figure 92:Incision à 12 heures pour séparer les deux lobes latéraux. ....	276
Figure 93:Détachement des lobes latéraux à partir du col vers 1 heure pour le lobe gauche, et 11 heures pour le lobe droit.....	277
Figure 94:Achèvement de l'énucléation des lobes latéraux en rejoignant la crosse de hockey. ....	278
Figure 95:Le morcellateur VersaCut de Lumenis.....	286
Figure 96:Le morcellateur PIRANHA .....	286

## LISTE DES GRAPHIQUES

Graphique 1:Résultats de l'étude de Salomon et al. sur l'élastographie .....	104
Graphique 2:Types de courbes intensité/temps .....	113
Graphique 3:Comparaison de la sensibilité et la spécificité entre U-NET et PI-RADS.....	126
Graphique 4:Comparaison des VPP entre PI-RADS seul et combinée avec U-Net. .....	127
Graphique 5:Types de Chevauchements selon Lee et al. ....	137
Graphique 6:Nombre d'artères prostatiques par moitié pelvienne .....	173
Graphique 7:Nombre d'artères prostatiques indépendantes/ moitié pelvienne .....	174
Graphique 8:Les types d'anastomoses les plus fréquemment trouvés .....	179
Graphique 9:Origine des artères pudendales accessoires .....	185
Graphique 10:Les variations anatomiques des veines selon Robert P.Myers ..	192
Graphique 11:Comparaison des taux de récurrence biochimique entre les prostatectomies périnéales et rétropubiennes.....	226

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Recommandation des délais à respecter lors du dosage du PSA après certaines actions. ....	82
Tableau 2 : Comparaison entre mUS et IRMmp.....	107
Tableau 3 : PI-RADS™ v2.1 .....	116
Tableau 4 : L'échelle de Likert .....	121
Tableau 5: Comparaison entre les groupes PR et AR.....	123

## LISTE DES ABREVIATIONS:

AESOP : Système endoscopique automatisé pour positionnement optimal

(Automated Endoscopic System for Optimal Positioning)

ATFP : Arcade tendineuse du fascia pelvien

csPCa : Cancer de la prostate cliniquement significatif (clinically significant prostate cancer.)

CVD : Complexe veineux dorsal (Dorsal Venous Complex)

CPRC : Cancer de la prostate résistant à la castration

DCE : Imagerie dynamique avec injection de contraste (Dynamic Contrast-Enhanced Imaging)

DHT : Dihydrotestostérone

DWI : Imagerie par diffusion (Diffusion-Weighted Imaging)

ERD : Examen rectal digital

FD : Fascia de Denonvilliers

FNV : Faisceaux neurovasculaires

FPP : Fascia pelvien pariétal

HBP : Hyperplasie bénigne de la prostate

Ho:YAG : Holmium:Yttrium-Aluminum-Garnet (Laser Holmium)

HoLEP : Énucléation de la prostate au laser Holmium (Holmium Laser Enucleation of the Prostate)

IRMmp : Imagerie par résonance magnétique multiparamétrique

LUTS : Symptômes du bas appareil urinaire (Lower Urinary Tract Symptoms)

mUS : Micro-échographie (Micro-Ultrasound)

NIC : Institut National du Cancer

NVB : Faisceau neurovasculaire (Neurovascular Bundle)

PI-RADS : Prostate Imaging Reporting and Data System

PRP : Prostatectomie radicale périnéale

PRAR : Prostatectomie radicale assistée par robot.

PRR : Prostatectomie radicale rétropubienne

PSA : Antigène spécifique de la prostate (Prostate-Specific Antigen)

PUMA : Programmable Universal Machine for Assembly

QoL : Qualité de vie (Quality of Life)

RTUP : Résection transurétrale de la prostate

SFMA : Stroma fibromusculaire antérieur

SUG : Sinus urogénital

TRUS : Échographie transrectale (Transrectal Ultrasound)

TUIP : Incision transurétrale de la prostate

TUR syndrome : Syndrome de résection transurétrale (Transurethral Resection Syndrome)

TURP : Transurethral Resection of the Prostate (Résection transurétrale de la prostate)

VIP : Technique de l'Institut Vattikuti (Vattikuti Institute Prostatectomy)

ZC : Zone centrale

ZEUS : Système télémanipulateur chirurgical ZEUS

ZP : Zone périphérique

ZT : Zone de transition

# INTRODUCTION

La prostate est un organe central du système reproducteur masculin dont la localisation anatomique et les relations avec les structures environnantes présentent des défis uniques pour les chirurgiens, en particulier lors de la prostatectomie radicale. La maîtrise de l'anatomie périprostatique est indispensable pour concilier les deux objectifs essentiels de la chirurgie du cancer de la prostate :

- Le contrôle oncologique, permettant une résection complète des tissus cancéreux
- La préservation des fonctions érectiles et urinaires, indispensables pour la qualité de vie des patients en post chirurgical.

Au cours des dernières décennies, les avancées dans la connaissance de l'anatomie chirurgicale de la prostate ont permis d'améliorer significativement les résultats des interventions chirurgicales et de développer de nouvelles approches opératoires, optimisant ainsi les suites postopératoires. Par ailleurs, les complications postopératoires, telles que les fuites urinaires persistantes ou les lésions nerveuses, ont suscité et continuent de susciter de nombreuses études visant à en comprendre les mécanismes.

Ce cercle vertueux, dans lequel les données anatomiques orientent l'évolution des techniques chirurgicales et les résultats cliniques inspirent de nouvelles recherches, constitue le moteur de l'amélioration continue en chirurgie. Il contribue également à l'émergence de techniques chirurgicales mini-invasives, offrant des options thérapeutiques mieux adaptées aux besoins des patients.

Néanmoins, la complexité anatomique de la région périprostatique, due à la proximité des faisceaux neurovasculaires responsables de l'érection, des muscles pelviens et des structures impliquées dans la continence et d'autres structures nobles non sacrificables chirurgicalement, ainsi qu'au fait que la prostate n'est pas un organe naturellement accessible dans l'espace pelvien contrairement à d'autres organes, représente un défi chirurgical majeur.

Chaque patient présente des variations anatomiques individuelles, notamment au niveau de l'agencement des structures et des rapports entre la prostate et les différents organes et structures avoisinantes. Ces différences, couplées à la difficulté de délimiter précisément les limites naturelles des structures anatomiques à ce niveau, exigent une approche personnalisée de la dissection chirurgicale afin d'optimiser les résultats fonctionnels tout en assurant une résection efficace sur le plan oncologique.

Ainsi, l'étude approfondie de l'anatomie prostatique ne se limite pas à une simple description des structures anatomiques, mais constitue un socle indispensable à l'évolution des pratiques chirurgicales qui permet non seulement d'optimiser la sécurité et l'efficacité des interventions, mais aussi de mieux appréhender les mécanismes des complications et de personnaliser la prise en charge de chaque patient.

Ce travail vise à offrir une description exhaustive des structures anatomiques pertinentes autour de la prostate, en mettant l'accent sur celles qui revêtent une importance particulière pour la pratique chirurgicale, Il intègre par ailleurs une revue de la littérature concernant l'histoire, la physiologie,

l'embryologie, l'imagerie médicale et les différentes approches chirurgicales de la prostate.

# HISTOIRE DE L'ANATOMIE DE LA PROSTATE

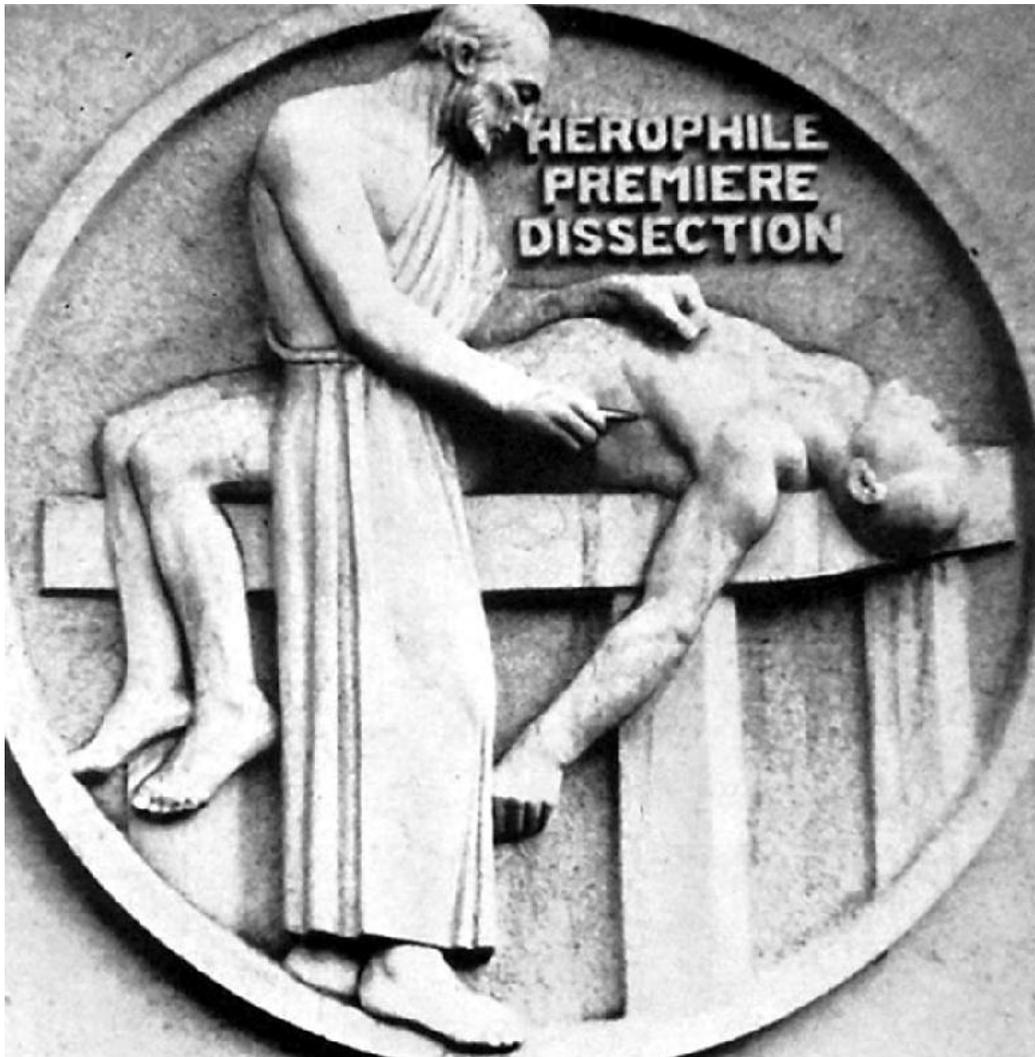
L'histoire de l'anatomie a été marquée par de nombreuses personnalités significatives, parmi lesquelles Hérophile de Chalcédoine (Figure 1) occupe une place prépondérante.



**Figure 1:Hérophile**

Il est fréquemment reconnu comme le premier à avoir réalisé des dissections systématiques du corps humain (figure 2), bien avant les célèbres travaux d'Andreas Vesalius, généralement considéré comme le père de l'anatomie moderne, Hérophile s'est distingué en pratiquant ces dissections à une époque où elles étaient entourées de tabous [3]. Les croyances de l'époque, largement influencées par Platon, faisaient penser que l'âme restait prisonnière du corps après la mort. Malgré cette forte opposition, Hérophile a pu travailler dans une courte fenêtre où la dissection humaine était permise. Cette pratique fut ensuite progressivement abandonnée, puis interdite pendant une longue période, dont

on peut estimer la durée à environ 1500 à 1800 ans, selon les régions et les époques, avant de revenir au XVIe siècle.

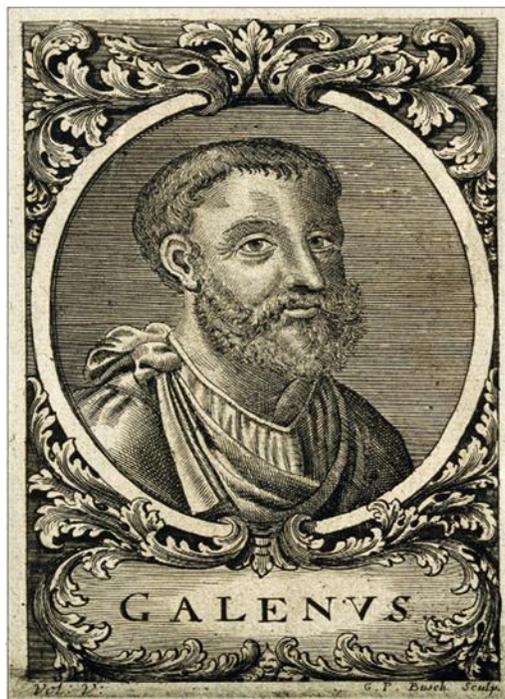


**Figure 2:Dissection réalisée par Hérophile.**

Hérophile a fait de grandes avancées en étudiant le corps humain, mais ses travaux n'ont pas été sans controverse. Il a non seulement disséqué des cadavres humains, mais il est aussi possible qu'il ait mené des vivisections sur des prisonniers condamnés à mort, une pratique qui a soulevé des questions, Hérophile a également exploré l'anatomie animale, ce qui lui a permis de développer une compréhension plus complète de la physiologie [3].

Dans le domaine de la médecine reproductive, Hérophile a apporté des contributions majeures. Il a décrit l'utérus comme un organe creux, révolutionnant ainsi la compréhension des organes reproducteurs féminins à son époque, Il a également été le premier à reconnaître que les testicules produisent des spermatozoïdes, ce qui a grandement fait progresser les connaissances sur la reproduction masculine. De plus, Hérophile est crédité de la première description de la prostate [3].

Bien que la plupart des travaux d'Hérophile aient été perdus dans l'incendie de la célèbre bibliothèque d'Alexandrie, ses découvertes sont connues grâce aux écrits d'auteurs postérieurs, tels que Galien de Pergame (Figure 3) [3].



**Figure 3: Claude Galien**

Ce dernier a repris certaines des recherches d'Hérophile, notamment sur des glandes qu'il appelait "parastatai adenoïdes", qu'il croyait être responsables de la production d'un liquide stimulant l'acte sexuel. L'interprétation de ces

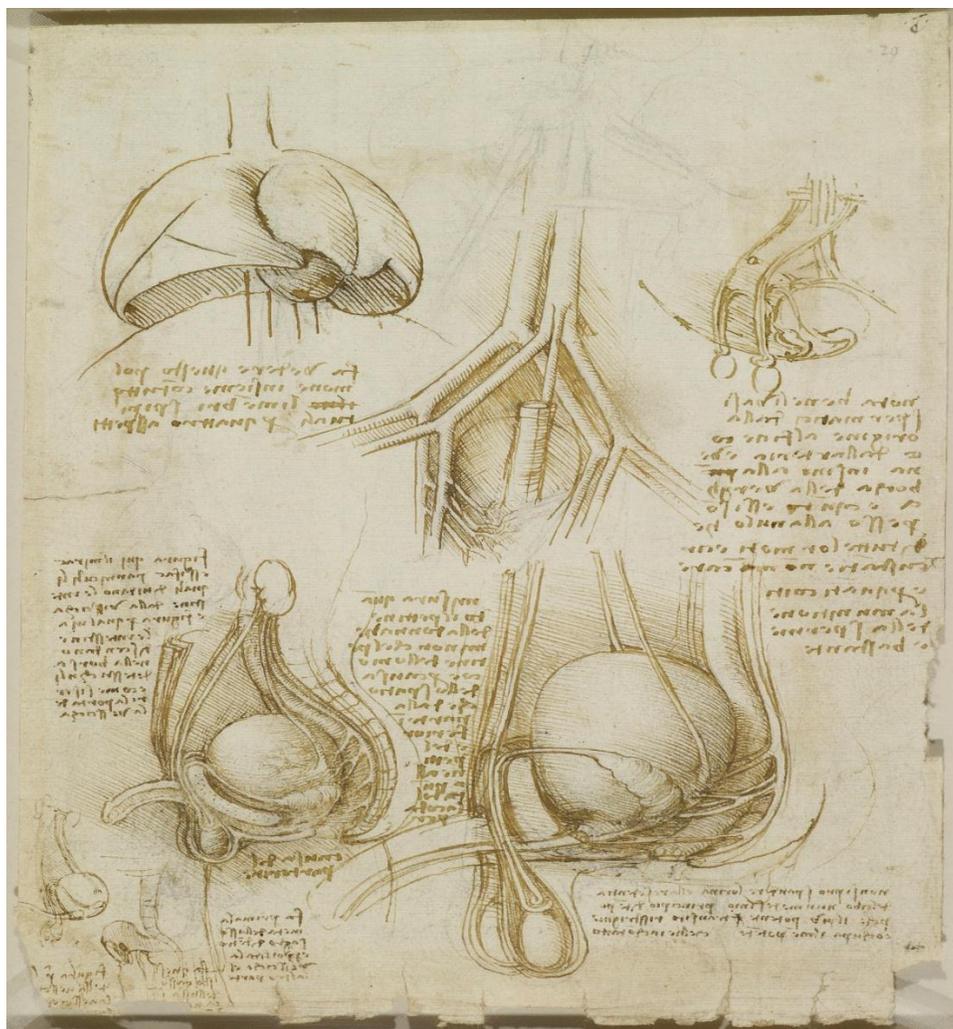
glandes et leur rôle exact reste sujette à débat, cette ambiguïté pourrait provenir des dissections animales, qui ont pu conduire à des confusions entre les glandes humaines et les structures semblables chez les animaux [3].

Les études anatomiques de Léonard de Vinci (Figure 4) révèlent à quel point il était difficile d'identifier la prostate lors des dissections humaines à cette époque.



**Figure 4:Portrait de Leonardo da Vinci.**

Ses autopsies du tractus génital masculin sont remarquables par leur précision et leur aspect artistique, notamment dans la représentation des canaux séminaux et des vésicules séminales (Figure 5). Cependant, il est intéressant de noter qu'aucun de ses dessins ne montre la prostate, ce qui laisse penser qu'il ne l'avait pas identifiée ou qu'il n'avait pas pu la représenter dans ses travaux [6].



**Figure 5: Les représentations de l'appareil urogénital par Léonard de Vinci**

C'est le médecin vénitien Niccolo Massa (Figure 6) qui fit la première mention de la prostate dans son livre introductif d'anatomie "Anatomiae libri introductorius" de 1536 :



**Figure 6: Niccolò Massa**

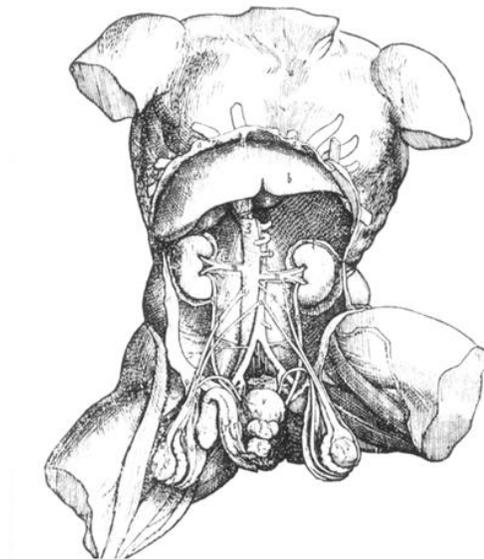
"... vous trouverez une chair glandulaire sur laquelle repose le col de la vessie et les extrémités des vaisseaux séminaux mentionnés précédemment ... À travers ces caroncules passent également les vaisseaux séminaux ...", et a donc été considéré comme ayant redécouvert la prostate [8]. Au XVI<sup>e</sup> siècle, André Vésale (Figure 7), souvent considéré comme le père de l'anatomie moderne, s'est penché sur l'étude de la prostate, un organe qui allait jouer un rôle crucial dans l'histoire de l'anatomie. La première mention de cette glande apparaît dans son œuvre de 1538 [4], mais c'est dans son livre "De Humani Corporis Fabrica", publié par Oporinus à Bâle en 1543, qu'il en propose une description détaillée. Il y écrit : « Le corps glandulaire dans lequel se rejoignent les vaisseaux qui transportent le sperme, situé à la base de la vessie et de son col. C'est un seul corps, souvent plus gros que les testicules. Il n'est pas exactement rond, mais présente une

dépression à l'avant et à l'arrière ; sur les côtés, il est parfaitement sphérique. À travers son centre passe le canal vésical... » [9].



**Figure 7:Portrait de André Vésale (1514 – 1564)**

Vésale ne s'est pas contenté de décrire la prostate, il a aussi réussi à la différencier des vaisseaux déférents comme un organe à part entière [5], bien qu'il n'ait pas inclus les vésicules séminales dans cette distinction. Il localise la prostate entre la vessie et le sphincter annulaire, et dans le texte qui l'accompagne, il utilise des termes comme « corps glandulaire » (corpus glandulosum) et « glandulaire accessoire ». En agissant ainsi, Vésale a modernisé la terminologie galénique en déplaçant le terme « corps glandulaires », habituellement réservé aux vésicules séminales, vers la prostate récemment identifiée [5].



**Figure 8: Dessin d'André Vésale montrant les organes urogénitaux**

Après l'époque de Vésale, les chercheurs ont accepté l'existence de la prostate, mais il y avait encore des désaccords sur sa nature : était-elle un organe

apparié ou non ? En ce qui concerne ses fonctions, quatre théories différentes ont vu le jour. Certains pensaient que la prostate aidait à raffiner le sperme provenant des testicules, tandis que d'autres affirmaient qu'elle séparait un liquide lacté piquant du sang pour augmenter le plaisir sexuel. Une autre théorie soutenait qu'elle produisait un fluide pour humidifier et protéger l'urètre, alors qu'un quatrième groupe de chercheurs croyait que le sperme était produit dans la prostate [6].

Caspar Bartholin l'Aîné (Figure 9), un anatomiste danois, a décrit la prostate comme un organe spongieux et apparié, connecté à l'urètre par des pores, dont la sécrétion avait pour rôle de protéger l'urètre [4].



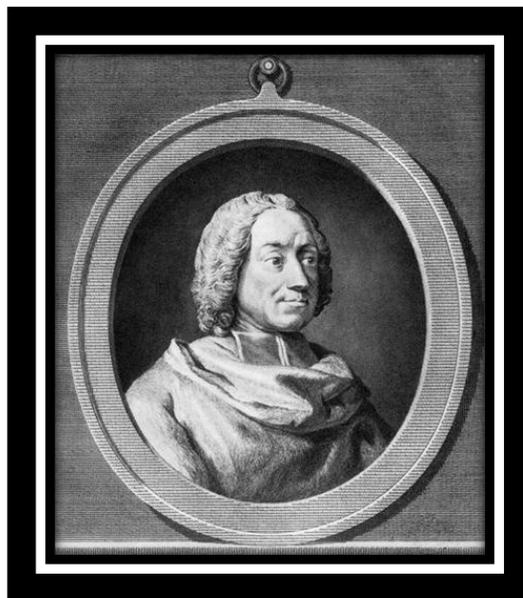
**Figure 9: Caspar Bartholin le Vieux**

Fait intéressant, Bartholin a également remarqué, tout comme Massa, la sortie commune des vésicules séminales et des canaux séminales. Il fut l'un des premiers à proposer une étymologie, bien que partiellement incorrecte, du terme

en disant : « Les prostatae, cependant, sont des glandes, que les Grecs appellent ainsi parce qu'elles se trouvent à l'avant. »

Dans la littérature anatomique des XVIIe et XVIIIe siècles, le pluriel "prostatae" était prédominant, cette forme apparaît dans un traité bien connu, où il a révélé ses connaissances limitées en grec en affirmant que « Les prostatae, ainsi appelées par les anciens comme si elles étaient des témoins [c'est-à-dire, parastatae], sont simplement un corps spongieux rempli de diverses petites glandes. » Néanmoins, c'est dans ce traité que l'organe a été pour la première fois représenté aux côtés des vésicules séminales et des canaux séminales dans un dessin distinct, qui ne diffère guère des représentations contemporaines.

En 1732, Jacob B Winslow (), membre de l'Académie royale des sciences à Paris, considérait déjà la prostate comme un organe double. Cependant, en 1804, l'anatomiste et chirurgien anglais John Abernethy continuait de parler de deux prostatae.



**Figure 10: Jacob B. Winslow (1669–1760)**

D'autre part, le terme singulier "prostata" n'était utilisé que de manière sporadique. En 1652, le chirurgien anglais Nathaniel Highmore, qui était ami avec William Harvey, fut l'un des premiers à adopter cette variante. Selon Highmore, « ces atomes (séminal) sont séparés par les testicules, un corps glandulaire ; ensuite, ils sont transportés à la prostate, une glande aussi. » [4] Un tournant dans l'usage médical est survenu en 1792 avec une annotation dans une nouvelle édition d'un manuel de l'anatomiste et chirurgien anglais William Cheselden (Figure 11), où il écrivait que :« les prostatae sont deux glandes, ou plutôt une, de la taille d'une noix de muscade. »



**Figure 11:William Cheselden (1688-1752)**

Grâce à des méthodes de recherche de plus en plus précises en anatomie normale et pathologique, ainsi qu'à des connaissances acquises par la pratique chirurgicale, l'unité morphologique de l'organe a pu être établie autour de 1800. À partir de ce moment, le terme "prostata" a commencé à s'imposer dans le vocabulaire urologique.

Plusieurs éléments anatomiques ont été identifiés et désignés au XIXe siècle, tels que l'apex prostatae, la base prostatae, le lobus medius, la facies vesicalis, la facies pubica et la facies rectalis. Le lobe médian, qui est très important dans l'hypertrophie prostatique, a été plusieurs fois désigné comme 'Home lobe', l'Isthmus prostatae, le lobus pathologicus, le lobus inférieur ou la portion médiane.

Enfin, au cours du XXe siècle, de nombreux termes dérivés cliniquement ont émergé, allant du prostatisme à l'antigène spécifique de la prostate. L'organisation anatomique de la prostate a fait l'objet de nombreuses études au cours du siècle dernier. Après la description des lobes prostatiques par Lowsley et al en 1915 [6], et puis de Mcneal en 1968 [2].

L'urologue américain Patrick C. Walsh est reconnu pour avoir révolutionné la chirurgie de la prostate en développant une approche anatomique précise. Cette technique, qui préserve les nerfs responsables de la fonction érectile, a significativement réduit les complications post-opératoires, notamment l'impuissance [7].



Figure 12:Patrick C. Walsh, MD

# ORGANOGENESE DE LA PROSTATE

## **I. Introduction:**

L'étude de l'organogenèse de la prostate a traversé plusieurs étapes marquantes au fil de l'histoire. Dès les premières observations anatomiques réalisées par Andreas Vesalius au 16e siècle jusqu'aux récentes avancées en biologie cellulaire, notre compréhension du développement et de la structure de la prostate s'est considérablement enrichie.

Des recherches contemporaines ont mis en lumière le rôle d'interactions complexes entre l'épithélium et le mésenchyme, sous l'influence d'hormones telles que la dihydrotestostérone (DHT) dans la régulation du développement et de la croissance de la prostate. Ces découvertes ont contribué à une meilleure compréhension des mécanismes fondamentaux de la morphogenèse des canaux prostatiques et de la différenciation cellulaire in utero. De plus, elles ont ouvert de nouvelles perspectives pour les recherches sur les maladies prostatiques à l'âge adulte [13].

Ainsi, notre compréhension de l'organogenèse de la prostate a évolué, passant de descriptions anatomiques élémentaires à des modèles complexes fondés sur les interactions cellulaires et hormonales. Cette progression nous fournit désormais des outils essentiels pour la compréhension, le diagnostic et le traitement des pathologies prostatiques avec une précision accrue.

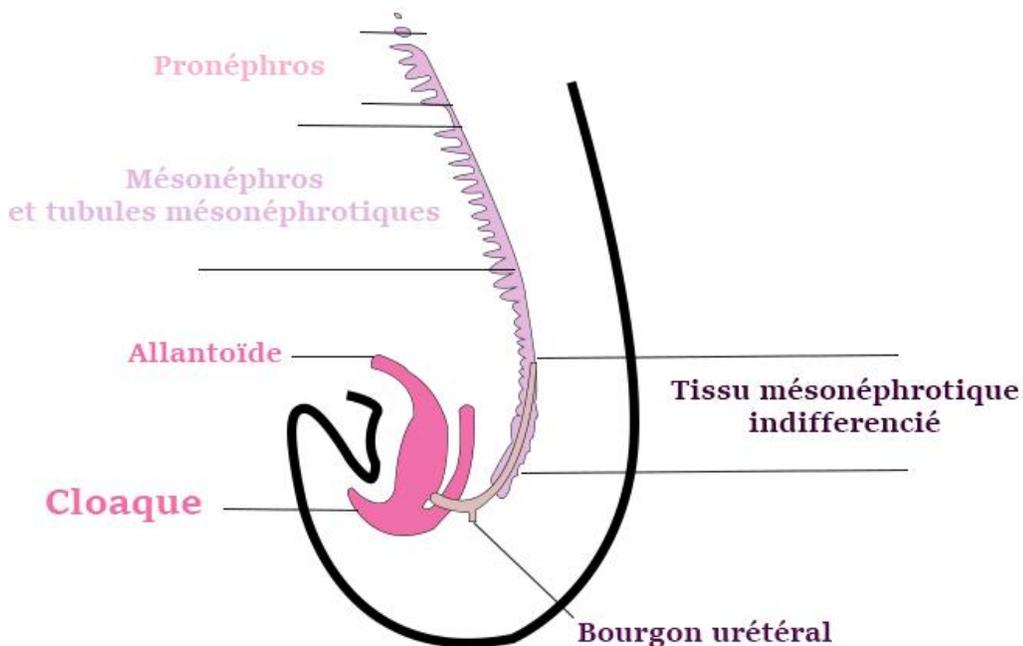
## **II. Initiation de la Prostate:**

Le développement de la prostate débute autour de la 10<sup>e</sup> semaine de gestation, sous l'influence des androgènes, principalement la dihydrotestostérone (DHT), un dérivé de la testostérone produit par l'action de l'enzyme 5 $\alpha$ -réductase. Ce processus transforme le sinus urogénital (UGS), une structure embryonnaire d'origine endodermique, pour initier la formation de la prostate [10,11,12].

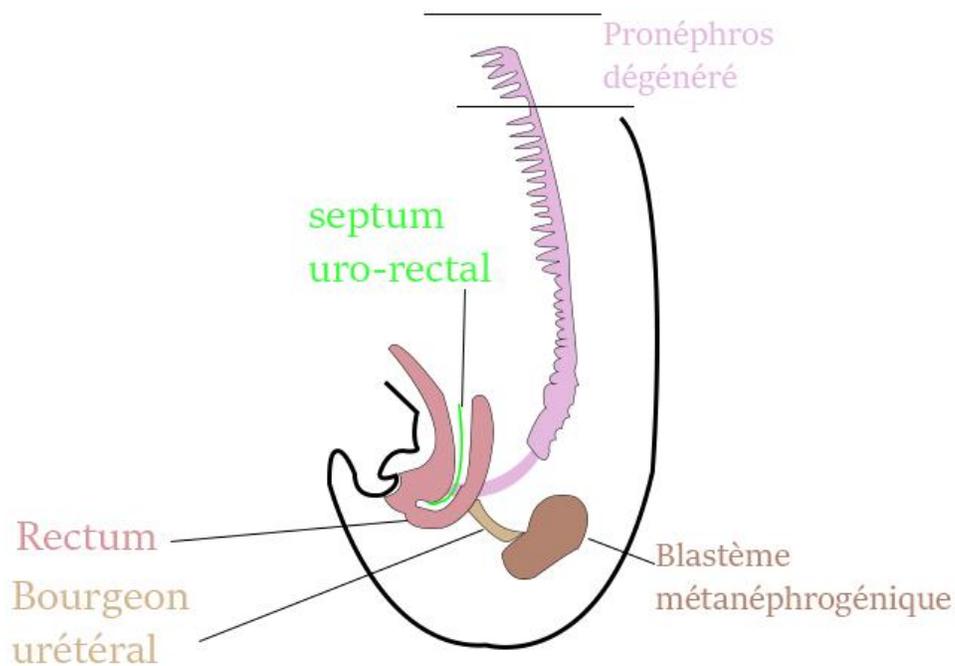
### **1. Origine et Développement Embryonnaire :**

#### **1.1 Formation du Sinus Urogénital:**

Le sinus urogénital constitue une entité essentielle dans l'évolution des systèmes urinaire et reproducteur. Il émerge de la segmentation du cloaque (Figure 13), une cavité partagée par les voies digestives, urinaires et reproductrices durant les phases initiales du développement embryonnaire.



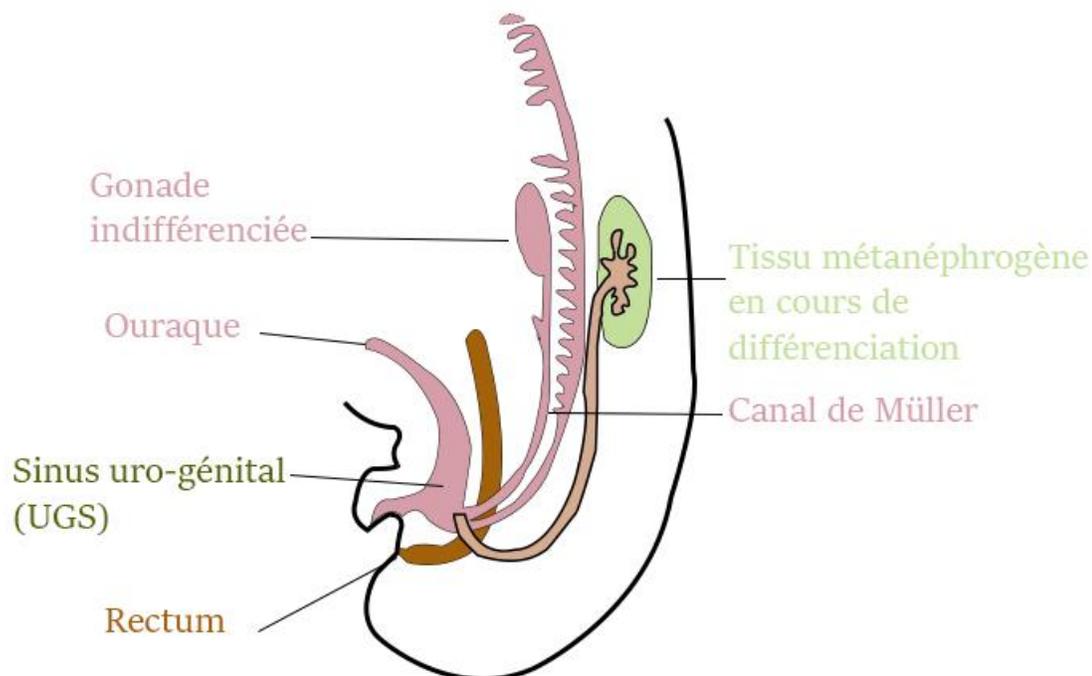
**Figure 14:Aspect du cloaque (4ème semaine)**



**Figure 13:Division du cloaque par le SUR (6ème semaine)**

Cette segmentation se produit lorsque le septum uro-rectal (Figure 14) se forme, divisant ainsi le cloaque en deux sections distinctes :

- Le sinus urogénital en avant (Figure 15)
- Le rectum en arrière [17]



**Figure 15: Formation du SUG (8ème semaine)**

La plupart des tubules mésonéphrotiques régressent, mais quelques-uns persistent pour former les canalicules efférents (vasa efferentia) du système génital masculin ; le canal mésonéphrotique (canal de Wolff) persiste pour former:

- Le canal de l'épididyme
- Le canal déférent
- La vésicule séminale

- Le canal éjaculateur du système génital

Le sinus urogénital se divise en deux segments :

- Une partie céphalique (supérieure) responsable de la formation de la vessie
- Une partie caudale (inférieure), qui, chez les individus de sexe masculin, engendre des structures telles que la prostate et une portion de l'urètre.[17]

À partir de la portion caudale du sinus urogénital, des bourgeons prostatiques émergent dans l'épithélium du sinus urogénital et envahissent le mésenchyme environnant sous l'influence des androgènes, formant les premières bases de la prostate. [10,12]

### 1.2 Rôle des Androgènes et des Hormones :

Les précurseurs des voies génitales internes et externes sont identiques chez les mâles et les femelles aux environs de la sixième semaine de gestation. La différenciation vers le sexe masculin est induite par le gène SrY ainsi que l'hormone anti-müllérienne, la testostérone et surtout dihydrotestostérone (DHT). En l'absence du gène SrY, le développement du tractus génital suit une voie féminine [16].

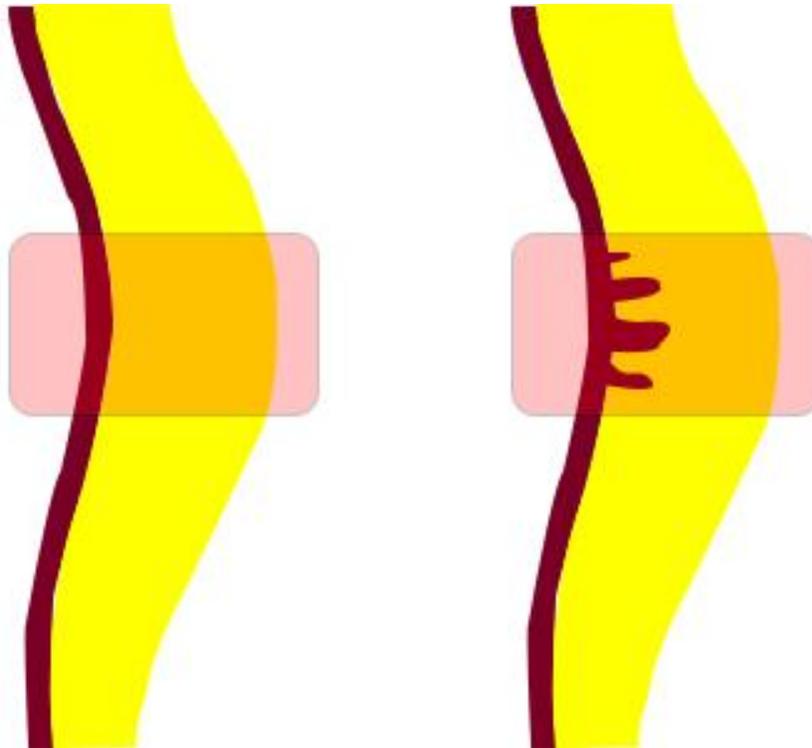
L'hormone anti-müllérienne induit la régression de la portion crâniale du canal de Müller, **étape essentielle** dans la formation de la prostate. Ce processus de régression est associé à un gradient crânio-caudal de la protéine réceptrice de l'hormone anti-müllérienne, précédé par une onde d'apoptose qui se propage le long du canal de Müller à mesure qu'il se développe vers le caudal.[17].

Les androgènes, sont essentiels à l'initiation du développement prostatique. Vers la 10e semaine, les testicules fœtales produisent de la testostérone, convertie en DHT par l'enzyme 5-alpha réductase, se lie aux récepteurs des androgènes dans les cellules épithéliales et mésenchymateuses. Cette liaison déclenche la prolifération cellulaire nécessaire à la formation des bourgeons prostatique [10,11].

Une recherche menée par Takeda et ses collègues en 1986 a mis en évidence la dépendance aux androgènes dans le développement des bourgeons prostatiques au sein des sinus urogénitaux de fœtus de rat, en utilisant des traitements androgéniques de courte durée. Les résultats obtenus ont démontré que les androgènes sont capables d'induire la formation de bourgeons prostatiques de novo dans des cultures d'organes des sinus urogénitaux, et que le mésenchyme, sous l'influence des androgènes, joue un rôle crucial dans l'initiation de la formation des bourgeons épithéliaux [19].

### **1.3 Formation des Bourgeons Prostatiques :**

Sous l'action des androgènes, les cellules épithéliales du sinus urogénital prolifèrent dans le mésenchyme pour former les bourgeons prostatiques (figure 16). Ces bourgeons jouent un rôle crucial dans la création des lobes prostatiques et dans l'établissement des canaux prostatiques qui vont se ramifier à mesure que la prostate se développe [10,11].



**Figure 16: L'épithélium du sinus urogénital bourgeonne dans le mésenchyme environnant**

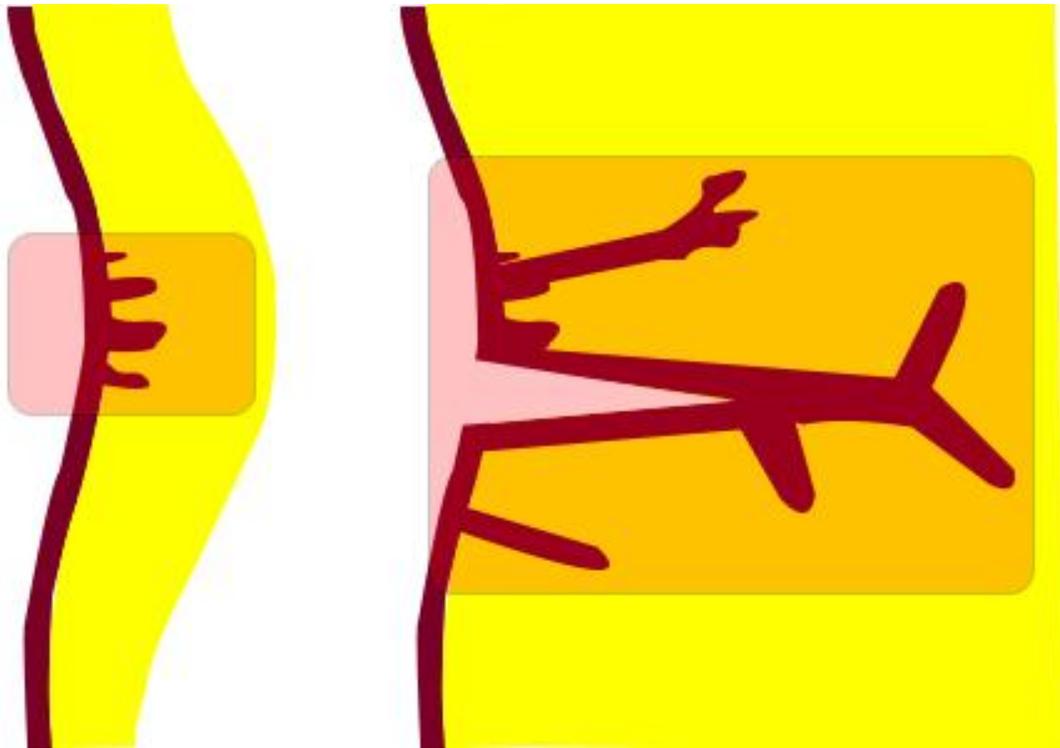
#### **1.4 Interactions Épithélium-Mésenchyme :**

Les interactions entre l'épithélium et le mésenchyme environnant sont primordiales. Le mésenchyme, influencé par les androgènes, envoie des signaux qui favorisent la prolifération et la différenciation des cellules épithéliales. Ces interactions sont essentielles pour garantir le bon développement de la prostate et de ses lobes [11,12].

#### **1.5 Premières Étapes de Ramification :**

Les bourgeons prostatiques commencent ensuite à se ramifier pour former un réseau complexe de canaux prostatiques (Figure 17). Cette ramification, régulée par les androgènes et les interactions entre l'épithélium et le

mésenchyme, constitue une étape clé du développement de la prostate adulte [10,12].



**Figure 17: Ramification des bourgeons prostatiques**

La ramification est une étape clé dans le développement de la prostate, impliquant la division et l'extension des bourgeons prostatiques pour former un réseau complexe de canaux. Ce processus est régulé par des interactions entre l'épithélium et le mésenchyme, ainsi que par plusieurs voies de signalisation.

Les androgènes, notamment la DHT, continuent de réguler ce processus en activant les récepteurs des androgènes dans l'épithélium des bourgeons prostatiques. Cette activation stimule la prolifération des cellules et favorise la ramification des bourgeons. En plus des androgènes, plusieurs voies de signalisation, comme WNT, FGF (Facteurs de Croissance des Fibroblastes), et TGF- $\beta$  (Facteur de Croissance Transformant bêta), sont cruciales pour

coordonner l'interaction entre l'épithélium et le mésenchyme. [1,2]. Ces voies régulent la manière dont les bourgeons se ramifient, en guidant leur structure et leur orientation dans le mésenchyme [11,12].

En conclusion, l'initiation de la prostate repose sur l'action des androgènes et des interactions cellulaires complexes entre le sinus urogénital et le mésenchyme environnant, menant à la formation des structures prostatiques de base.

### **III. Cytodifférenciation et Canalisation:**

La cytodifférenciation et la canalisation sont des étapes clés dans le développement final de la prostate. Ces processus assurent la transformation des bourgeons prostatiques en structures fonctionnelles capables de sécréter le fluide prostatique. La cytodifférenciation implique la spécialisation des cellules épithéliales en différents types cellulaires, tandis que la canalisation permet la formation des lumières au sein des canaux prostatiques.

#### **1. La cytodifférenciation:**

La cytodifférenciation est le processus par lequel les cellules épithéliales des bourgeons prostatiques se spécialisent en plusieurs types cellulaires distincts, chacun jouant un rôle spécifique dans le fonctionnement de la prostate (Figure 18). Les cellules épithéliales se différencient principalement en trois types :

- **Cellules luminales** : Ces cellules forment la paroi interne des canaux et sont responsables de la sécrétion du fluide prostatique.

- **Cellules basales** : Elles forment une couche protectrice en dessous des cellules luminales et assurent le soutien structural.
- **Cellules neuroendocrines** : Ces cellules, moins nombreuses, jouent un rôle dans la régulation hormonale de la prostate [10,12].

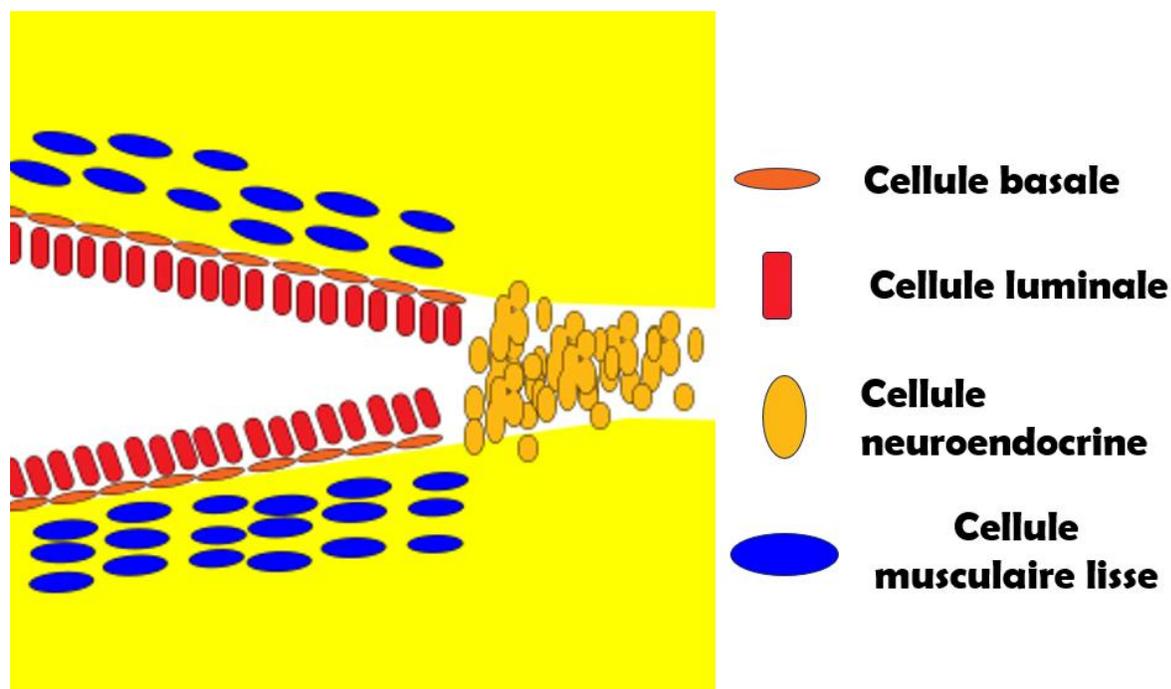


Figure 18: Les différents types de cellules issues du processus de cytodifférenciation.

Cette différenciation cellulaire est régulée par plusieurs facteurs, dont les androgènes (DHT), ainsi que des voies de signalisation moléculaires comme celles de WNT et TGF- $\beta$ . Ces signaux influencent directement la maturation des cellules épithéliales et leur disposition au sein des canaux prostatiques. [10,11]

## **2. Canalisation: Formation des Lumières:**

Après la cytodifférenciation, le processus de canalisation permet la formation de lumières, ou cavités, au sein des bourgeons prostatiques. Initialement, les bourgeons sont constitués de cellules solides, mais progressivement, des espaces creux se forment à l'intérieur des canaux en développement, créant les lumières qui caractérisent les canaux prostatiques. Ces lumières sont essentielles pour permettre le passage du fluide prostatique, une fonction clé de la glande.

La canalisation est également influencée par des interactions épithélio-mésenchymateuses. Le mésenchyme environnant joue un rôle en envoyant des signaux pour activer la formation des lumières dans les bourgeons ramifiés, transformant ainsi les structures solides en canaux creux fonctionnels. [11,12]

## **3. Rôle des Androgènes et des Signaux Moléculaires :**

Les androgènes, principalement la DHT, jouent un rôle central dans la régulation à la fois de la cytodifférenciation et de la canalisation. En se liant aux récepteurs des androgènes présents dans les cellules épithéliales et mésenchymateuses, la DHT active une cascade de signaux qui dirige la spécialisation cellulaire et la formation des lumières. Des voies de signalisation comme celles de WNT, FGF et TGF- $\beta$  sont également essentielles pour coordonner ces processus. [10,12]

## **4. Importance de la Cytodifférenciation et de la Canalisation :**

La cytodifférenciation et la canalisation sont cruciales pour le bon fonctionnement de la prostate. Une cytodifférenciation correcte garantit que

chaque type cellulaire est bien positionné et capable de remplir son rôle spécifique. La canalisation, en créant des canaux creux, permet à la prostate de sécréter le fluide prostatique dans l'urètre, une étape clé dans la reproduction masculine. Si ces processus sont perturbés, cela peut entraîner des anomalies dans la structure et la fonction de la prostate [11,12]

En conclusion, la cytodifférenciation et la canalisation sont des étapes essentielles dans la maturation de la prostate. Ces processus permettent la transformation des bourgeons prostatiques en un réseau de canaux fonctionnels, grâce à une spécialisation cellulaire et la formation de lumières régulées par des signaux hormonaux et moléculaires.

#### **IV. Conclusion:**

L'étude de l'organogenèse de la prostate offre des perspectives fondamentales pour la pratique médicale. Comprendre les mécanismes cellulaires et moléculaires qui régulent le développement de la prostate permet de mieux cerner l'origine des maladies prostatiques, telles que l'hyperplasie bénigne de la prostate et le cancer de la prostate.

En effet, les processus d'interactions entre l'épithélium et le mésenchyme, ainsi que l'influence des androgènes comme la dihydrotestostérone (DHT), sont des clés pour comprendre comment des dérèglements dans le développement prostatique peuvent mener à ces pathologies à l'âge adulte [14].

En approfondissant ces connaissances, il devient possible de diagnostiquer plus précocement les troubles liés à des anomalies dans la croissance de la prostate et de développer des stratégies thérapeutiques ciblées. La maîtrise des

mécanismes d'organogenèse peut également permettre l'émergence de traitements innovants. Par exemple, en ciblant les voies de signalisation qui régissent la différenciation cellulaire et la prolifération des canaux prostatiques, les chercheurs peuvent envisager de nouveaux traitements pharmacologiques ou hormonaux pour ralentir ou même inverser la progression de certaines maladies prostatiques. De plus, cette compréhension pourrait ouvrir la voie à des approches régénératives, telles que la thérapie cellulaire, pour traiter les dysfonctionnements graves de la prostate.

Ainsi, l'étude de l'organogenèse de la prostate ne se limite pas à une simple curiosité scientifique, mais constitue un pilier essentiel pour améliorer la prise en charge des maladies prostatiques et explorer de nouvelles avenues thérapeutiques.

# PHYSIOLOGIE DE LA PROSTATE

## **I. Introduction:**

La prostate est une glande exocrine indispensable au système reproducteur masculin, jouant un rôle fondamental dans la production du liquide séminal, élément clé de la fertilité masculine.

Son fonctionnement est principalement sous l'influence des androgènes, notamment la testostérone et sa forme active, la dihydrotestostérone (DHT), qui stimulent la prolifération et l'activité sécrétoire des cellules prostatiques. Néanmoins, le système hormonal complexe qui régule cette glande peut également être à l'origine de pathologies fréquentes telles que l'hypertrophie bénigne de la prostate (HBP) ou encore le cancer de la prostate.

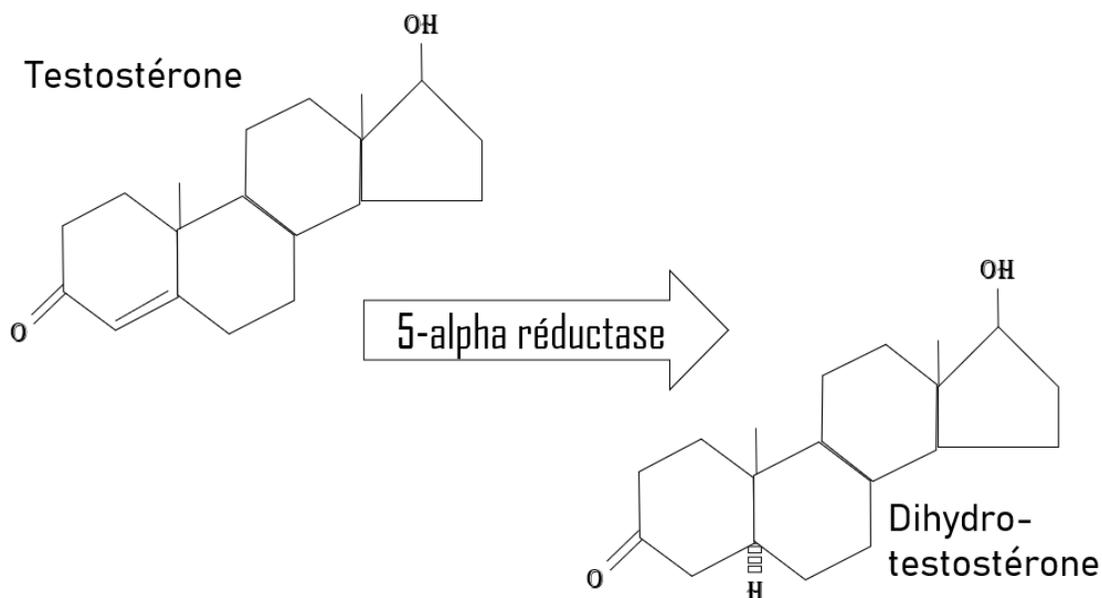
Ce chapitre examinera en profondeur ces mécanismes physiologiques afin de mieux comprendre le rôle crucial de la prostate et les dérèglements pouvant affecter son fonctionnement.

## **II. Régulation hormonale de la prostate**

La régulation hormonale de la prostate est principalement assurée par les androgènes, en particulier la testostérone et sa forme active, la dihydrotestostérone (DHT). Ces hormones sont cruciales pour le développement, le maintien et la fonction de la prostate tout au long de la vie masculine adulte.

## 1. Rôle des androgènes dans la croissance et la fonction prostatique :

La testostérone, produite essentiellement par les cellules de Leydig des testicules, est le principal androgène circulant dans le sang. Une fois dans les cellules prostatiques, la testostérone est convertie en dihydrotestostérone (DHT) par l'enzyme 5 $\alpha$ -réductase (Figure 19) [22].



**Figure 19: Conversion de la testostérone en dihydrotestostérone (DHT).**

La DHT est considérée comme le principal régulateur de la croissance prostatique et de son activité fonctionnelle. Elle se lie aux récepteurs androgéniques situés dans le noyau des cellules prostatiques, où elle stimule la transcription des gènes responsables de la prolifération et de la différenciation cellulaire [22,23]. Ce processus est essentiel pour le développement normal de la prostate à la puberté et pour le maintien de sa fonction à l'âge adulte.

Les récepteurs androgéniques, une fois activés par la DHT, déclenchent une série de processus cellulaires, notamment l'activation de la polymérase ARN et la synthèse de protéines spécifiques dans le cytoplasme, qui contribuent à la sécrétion des composants du liquide prostatique [22]. En l'absence de stimulation androgénique, la prostate subit une atrophie progressive, avec une réduction significative de son activité sécrétoire [23].

## **2. Axe endocrinien : contrôle hypothalamo-hypophyso-testiculaire :**

Le fonctionnement hormonal de la prostate est également influencé par un axe endocrinien complexe impliquant **l'hypothalamus, l'hypophyse et les testicules**. Ce circuit commence par la libération pulsatile de l'hormone de libération des gonadotrophines (LHRH) par l'hypothalamus. La LHRH stimule alors la production de l'hormone lutéinisante (LH) et de l'hormone folliculo-stimulante (FSH) par l'hypophyse [22].

La LH, en particulier, agit sur **les cellules de Leydig** pour favoriser la production de testostérone. Une fois produite, la testostérone circule dans le sang, où elle est soit utilisée directement par certains tissus cibles, soit convertie en DHT pour exercer ses effets sur la prostate [21].

### **3. Interaction avec d'autres hormones:**

Bien que les androgènes, tels que la testostérone et la dihydrotestostérone (DHT), soient les principaux régulateurs de la fonction prostatique, d'autres hormones, notamment les œstrogènes, jouent également un rôle important. L'interaction complexe entre ces hormones est essentielle pour maintenir la fonction prostatique, et tout déséquilibre dans cet équilibre hormonal peut conduire à des pathologies telles que l'hypertrophie bénigne de la prostate (HBP) et le cancer de la prostate [21,23].

#### **3.1. Rôle des œstrogènes dans la régulation prostatique :**

Les œstrogènes, bien que traditionnellement associés au système reproducteur féminin, jouent également un rôle dans la régulation de la prostate. Avec l'âge, les niveaux de testostérone **diminuent**, tandis que les niveaux relatifs d'œstrogènes **augmentent**. Cette modification hormonale est directement liée à la prolifération des cellules prostatiques, favorisant ainsi le développement de l'HBP [21,22].

Les œstrogènes agissent par l'intermédiaire de deux types de récepteurs dans la prostate : les récepteurs alpha ( $ER\alpha$ ) et bêta ( $ER\beta$ ). L'activation des récepteurs  $ER\alpha$  est associée à la prolifération cellulaire, tandis que l'activation des récepteurs  $ER\beta$  tend à inhiber cette prolifération. L'équilibre entre les actions des récepteurs alpha et bêta est fondamental pour le maintien d'une fonction prostatique saine et stable [23,24].

### **3.2. Synergie entre les œstrogènes et les androgènes :**

Les œstrogènes et les androgènes peuvent agir de manière synergique pour stimuler la croissance de la prostate. Des études ont montré que l'administration conjointe de DHT et d'œstrogènes induit une hypertrophie prostatique plus importante que celle provoquée par la DHT seule. Cela s'explique par le fait que les œstrogènes modulent l'expression des récepteurs androgéniques, amplifiant ainsi l'effet de la DHT sur les cellules prostatiques [22,24].

Cette synergie est particulièrement marquée dans le développement de l'HBP. Bien que la DHT soit le principal stimulant de la croissance prostatique, l'augmentation des niveaux d'œstrogènes, notamment à un âge avancé, renforce cette stimulation (Figure 20). Cela entraîne une prolifération excessive des cellules prostatiques, souvent responsable des symptômes cliniques observés dans l'HBP, tels que l'obstruction urinaire [22,23].

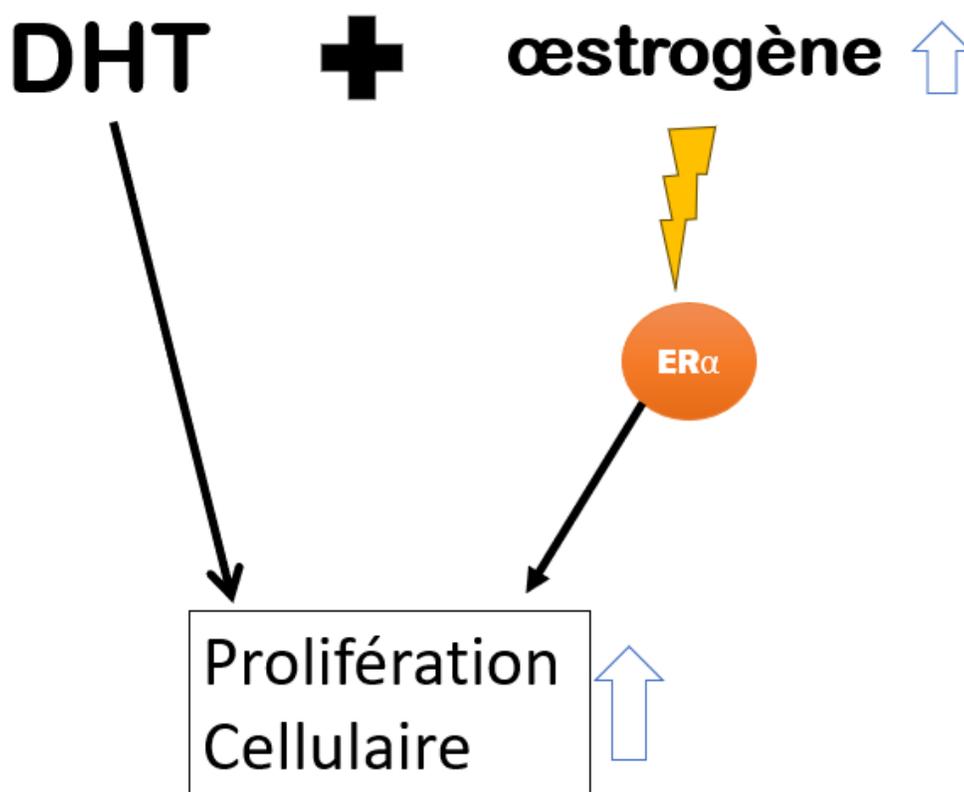


Figure 20: Synergie entre les œstrogènes et les androgènes

### III. Les sécrétions prostatiques et leurs fonctions

La prostate est essentielle dans la production du liquide séminal, qui constitue environ 30 % du volume total du sperme. Ce liquide est composé de plusieurs éléments clés tels que des ions, des enzymes et des substances chimiques essentielles à la protection et à la motilité des spermatozoïdes. Les sécrétions prostatiques jouent un rôle fondamental dans la fertilité masculine, en soutenant non seulement la santé des spermatozoïdes, mais aussi en contribuant à leur capacité à féconder l'ovule [21,22].

## 1. Composition du fluide prostatique:

Le fluide prostatique est riche en plusieurs composés cruciaux, dont les principaux sont :

-Zinc : Le zinc est présent en grande quantité dans les sécrétions prostatiques et agit comme un agent antimicrobien, protégeant les spermatozoïdes contre les infections dans le système reproducteur masculin et féminin [21,22].

-Acide citrique : Cet acide aide à maintenir un pH légèrement acide dans le liquide séminal, ce qui est essentiel pour stabiliser et protéger les spermatozoïdes contre les dommages oxydatifs [23].

-Spermine et spermidine : Ces polyamines sont impliquées dans la liquéfaction du sperme après l'éjaculation, un processus clé pour permettre aux spermatozoïdes de se déplacer librement dans les voies reproductrices [21,24].

-Phosphatases acides : Ces enzymes facilitent la mobilité des spermatozoïdes et jouent un rôle dans le métabolisme du phosphore [22,23].

## 2. Rôle fonctionnel des sécrétions prostatiques :

Les sécrétions prostatiques assurent plusieurs fonctions vitales pour les spermatozoïdes :

- Protection contre les infections : La concentration élevée en zinc et autres agents antimicrobiens dans le liquide prostatique aide à protéger les spermatozoïdes contre les infections lors de leur passage dans le tractus reproducteur [21,22].

- **Soutien à la mobilité des spermatozoïdes** : Grâce à la liquéfaction du sperme facilitée par les enzymes et les polyamines, les spermatozoïdes deviennent plus mobiles, chose essentiel pour atteindre l'ovule et assurer la fécondation [23,24].
- **Maintien de la stabilité des spermatozoïdes** : L'acide citrique contribue à protéger les spermatozoïdes en maintenant un environnement stable et en régulant le pH [21,23].

### **3. Régulation de la sécrétion :**

La production de liquide prostatique est régulée par les androgènes, en particulier la dihydrotestostérone (DHT). Sous l'effet de la stimulation hormonale, les cellules prostatiques sécrètent ce liquide dans l'urètre pendant l'éjaculation. La libération du liquide est synchronisée avec les sécrétions des vésicules séminales et des testicules pour former l'éjaculat [22,23].

En définitive, les sécrétions prostatiques sont fondamentales pour la survie, la protection et la mobilité des spermatozoïdes, jouant ainsi un rôle clé dans la fertilité masculine. Ces sécrétions, contrôlées par la régulation hormonale, sont essentielles pour garantir un environnement propice à la fécondation.

### **IV. Facteurs influençant la croissance de la prostate :**

La croissance et le maintien de la prostate sont influencés par une multitude de facteurs hormonaux, génétiques et environnementaux. Bien que les androgènes, principalement la testostérone et la dihydrotestostérone (DHT), soient les régulateurs principaux, d'autres hormones et facteurs de croissance

ont un impact significatif sur la dynamique cellulaire et fonctionnelle de la prostate.

### 1. Facteurs hormonaux :

Les androgènes, notamment la **testostérone** et la **dihydrotestostérone (DHT)**, jouent un rôle crucial dans la maturation de la prostate à partir de la puberté. Lorsque les niveaux de testostérone augmentent de manière significative à ce stade, ils orchestrent une cascade de processus biologiques qui soutiennent non seulement la croissance, mais aussi la maturation structurelle de la glande. Ces hormones stimulent la prolifération des cellules prostatiques ainsi que leur différenciation fonctionnelle. Sous leur influence, la prostate commence à croître rapidement et à développer sa capacité à produire le liquide séminal, un élément clé de la reproduction masculine [22, 23].

### 2. Facteurs de croissance :

Outre les hormones, les facteurs de croissance jouent également un rôle clé dans la régulation de la croissance prostatique. Certains facteurs de croissance, comme le **facteur de croissance des fibroblastes (FGF)** et l'**insuline-like growth factor (IGF)**, sont impliqués dans la prolifération des cellules épithéliales prostatiques. Ces facteurs agissent en activant des voies de signalisation intracellulaires qui favorisent la division et la survie des cellules [22,23].

Des études ont montré que l'IGF, en particulier, a un effet mitogène sur les cellules prostatiques. Il favorise leur prolifération tout en inhibant l'apoptose, ou la mort cellulaire programmée, ce qui entraîne une augmentation du volume

prostatique [21,24]. D'autres facteurs de croissance, tels que le facteur de croissance épidermique (EGF), agissent également en synergie avec les androgènes pour réguler la croissance cellulaire [21,22].

### **3. Facteurs environnementaux et génétiques :**

En plus des facteurs hormonaux et des facteurs de croissance, les facteurs environnementaux, tels que **l'alimentation**, et **les facteurs génétiques** influencent également la croissance de la prostate. Une alimentation riche en graisses et en produits laitiers a été associée à une augmentation du risque de développement de pathologies prostatiques [20]. De plus, les antécédents familiaux de maladies prostatiques augmentent également le risque de développer ces pathologies, suggérant ainsi une composante génétique significative [24].

### **4. Effets combinés des facteurs :**

Les effets combinés de ces divers facteurs déterminent l'évolution de la prostate tout au long de la vie d'un homme. Pendant la puberté, la stimulation androgénique entraîne une croissance rapide de la prostate. À l'âge adulte, cette croissance est maintenue par un équilibre délicat entre les androgènes et les facteurs de croissance. Cependant, avec l'âge, l'augmentation des niveaux relatifs d'œstrogènes, combinée à l'influence des facteurs de croissance, peut conduire à des pathologies telles que l'HBP [21,23].

En conclusion, la croissance et la fonction de la prostate sont régulées par une combinaison complexe de facteurs hormonaux, de facteurs de croissance, et de variables environnementales et génétiques. Une compréhension

approfondie de ces mécanismes est essentielle pour expliquer le développement des pathologies prostatiques.

## **V. Aspects physiopathologiques de la prostate :**

La prostate, en raison de sa dépendance hormonale et de sa prédisposition aux déséquilibres cellulaires, est prédisposée à plusieurs pathologies importantes, dont les plus courantes sont l'hypertrophie bénigne de la prostate (HBP) et le cancer de la prostate.

La compréhension des mécanismes physiopathologiques sous-jacents à ces conditions est essentielle pour le diagnostic, la prévention et le traitement de ces affections.

### **1. Hypertrophie bénigne de la prostate (HBP)**

L'HBP est une affection non maligne qui touche majoritairement **les hommes vieillissants**. Elle est caractérisée par une prolifération excessive des cellules stromales et épithéliales dans la zone transitionnelle de la prostate, entraînant une augmentation de la taille de la glande. Cette croissance est souvent attribuée à la stimulation continue par la dihydrotestostérone (DHT), malgré une diminution des niveaux de testostérone avec l'âge [21,22].

La DHT, dérivée de la testostérone par l'action de l'enzyme 5 $\alpha$ -réductase, reste active dans les cellules prostatiques et stimule la prolifération cellulaire, contribuant ainsi à l'élargissement de la prostate. Les récepteurs androgéniques, activés par la DHT, jouent un rôle central dans la régulation de la croissance cellulaire prostatique. La suractivation de ces récepteurs est une cause majeure

de l'HBP, ce qui entraîne une compression de l'urètre et des symptômes urinaires obstructifs tels que la dysurie, l'urgenterie et l'incontinence [21,23].

## 2. Cancer de la prostate :

Le cancer de la prostate constitue l'un des cancers les plus fréquemment diagnostiqués chez les hommes. Bien que les mécanismes moléculaires à l'origine de sa carcinogenèse ne soient pas encore entièrement élucidés, il est bien établi que les androgènes, notamment la dihydrotestostérone (DHT), jouent un rôle central dans la prolifération et la progression tumorale prostatique [21,23].

Les cellules cancéreuses prostatiques sont souvent caractérisées par une altération des récepteurs androgéniques, ce qui leur permet de proliférer en réponse à la stimulation hormonale continue. En outre, des mutations dans les voies de signalisation hormonale peuvent perturber l'équilibre entre la prolifération cellulaire et l'apoptose, conduisant à une croissance incontrôlée des cellules malignes [21, 23].

Le rôle des œstrogènes dans le cancer de la prostate est également un sujet d'intérêt croissant. Les niveaux relatifs d'œstrogènes augmentent avec l'âge, et certaines études suggèrent que ces hormones peuvent favoriser la transformation maligne des cellules prostatiques via les récepteurs œstrogéniques alpha ( $ER\alpha$ ). Parallèlement, l'activation des récepteurs  $ER\beta$  semble avoir un effet protecteur en inhibant la prolifération cellulaire (Figure 21) [23,24]. Ces observations suggèrent un rôle complexe des œstrogènes dans la pathogenèse du cancer de la prostate.

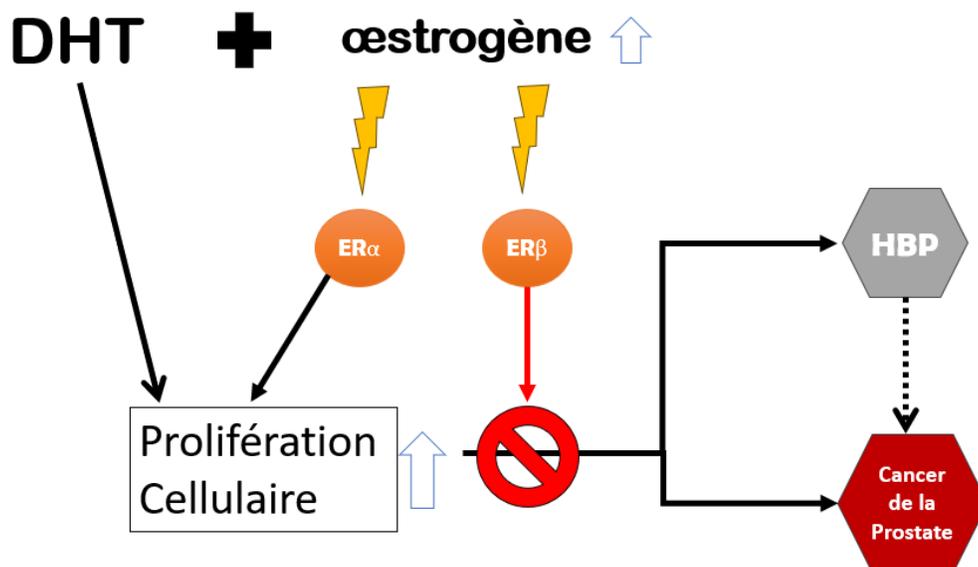


Figure 21: Interaction entre la dihydrotestostérone (DHT) et les œstrogènes

### 3. Facteurs de risque et prédispositions :

Les principaux facteurs de risque de l'HBP et du cancer de la prostate incluent l'âge, les antécédents familiaux et l'exposition prolongée aux androgènes [22,24]. Par ailleurs, des facteurs environnementaux tels qu'une alimentation riche en graisses et en produits laitiers ont été associés à un risque accru de ces pathologies [20].

### 4. Développement de la résistance hormonale :

Avec le développement du cancer de la prostate, de nombreux patients finissent par développer une résistance à la thérapie androgénique, une condition connue sous le nom de cancer de la prostate résistant à la castration (CPRC).

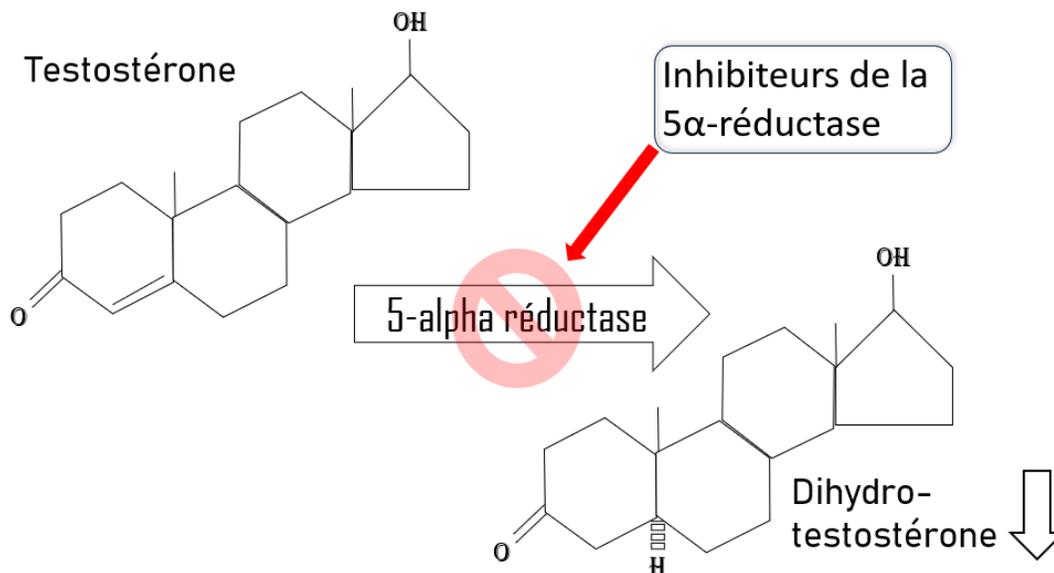
Ce type de cancer se développe lorsque les cellules prostatiques deviennent indépendantes de la stimulation androgénique pour leur croissance,

souvent en raison de mutations des récepteurs androgéniques ou d'une altération des voies de signalisation hormonale [21,22].

Le CPRC représente un défi thérapeutique majeur, car ces tumeurs continuent de croître malgré la suppression hormonale. Les recherches se concentrent actuellement sur des traitements ciblés qui agissent directement sur les mutations génétiques et les voies de signalisation altérées afin de mieux contrôler la progression du cancer [23,24].

### **5. Impact clinique et prise en charge :**

La gestion des pathologies prostatiques, qu'il s'agisse de l'HBP ou du cancer de la prostate, repose sur une évaluation approfondie des facteurs de risque individuels et de l'état hormonal des patients. Les traitements de l'HBP incluent des inhibiteurs de la 5 $\alpha$ -réductase, qui bloquent la conversion de la testostérone en DHT, réduisant ainsi la stimulation androgénique et la taille de la prostate [21,22].



**Figure 22: Inhibition de la transformation de la testostérone en DHT**

Pour le cancer de la prostate, les traitements hormonaux, tels que l'hormonothérapie anti-androgène, sont couramment utilisés pour limiter la progression de la maladie [23].

En conclusion, la compréhension des mécanismes pathophysiologiques sous-jacents à l'HBP et au cancer de la prostate permet de mieux cibler les stratégies de traitement. Les changements hormonaux, génétiques et environnementaux jouent tous un rôle crucial dans le développement de ces affections, soulignant l'importance d'une approche multidimensionnelle pour leur prise en charge.

# EXPLORATIONS

## **I. PSA**

### **1. Introduction :**

L'antigène spécifique de la prostate PSA (ou protéine E1, P30,  $\gamma$ -séminoprotéine) est une glycoprotéine produite principalement par les cellules épithéliales de la prostate. Découvert pour la première fois dans les années 1960, le PSA a initialement été étudié pour son rôle dans la liquéfaction du sperme, facilitant ainsi la mobilité des spermatozoïdes après l'éjaculation. Cependant, c'est à partir de 1988 que son importance clinique a véritablement émergé, avec son adoption en tant que marqueur tumoral dans le dépistage et le suivi du cancer de la prostate [26,28].

Avec l'introduction du dosage du PSA dans les années 1990, le dépistage de masse pour le cancer de la prostate a été envisagé dans plusieurs pays. Cela a permis d'augmenter le nombre de diagnostics précoces, mais a également suscité des débats sur les risques de surdiagnostic et de surtraitement, notamment chez les hommes présentant des cancers à croissance lente qui n'auraient peut-être jamais nécessité de traitement [29].

Ce chapitre analysera en profondeur l'histoire du PSA, sa structure biochimique, ses applications cliniques ainsi que les avancées récentes visant à améliorer la précision de ce marqueur dans le diagnostic du cancer de la prostate.

### **2. Histoire du PSA :**

En 1960, Flocks fut le premier à expérimenter avec des antigènes dans la prostate [9], Dix ans plus tard, Richard J. Ablin, en collaboration avec Witebsky,

poursuivit les recherches immunologiques antérieures sur le liquide prostatique, en se focalisant par la suite sur le tissu prostatique lui-même. Ils mirent en évidence la présence d'antigènes de précipitation dans la prostate [34,35].

Par la suite, Mitsuwo Hara, professeur au Département de Médecine Légale de l'École de Médecine de l'Université de Kurume, entreprit une étude sur les antigènes présents dans le sperme humain, dans le but de les utiliser comme éléments de preuve dans les affaires de viol. Hara et ses collègues publièrent pour la première fois leurs résultats concernant la  $\gamma$ -séminoprotéine en 1966 [36], et en 1971, ils réussirent à caractériser cette protéine [37].

Dans les années 1960, les avancées rapides des techniques immunologiques ont considérablement élargi le champ de la recherche sur l'infertilité. Des études menées sur des modèles animaux ont permis d'explorer les fondements immunologiques de l'infertilité, indiquant que des anticorps pouvaient entraver la mobilité des spermatozoïdes, ce qui bloquait le processus de fertilisation. L'objectif de la recherche d'antigènes spécifiques dans le sperme était de développer des approches immunologiques pour réguler la fertilité. En 1973, Li et Beling isolèrent et caractérisèrent les antigènes E2 et E1 [38], ce dernier a été démontré comme présentant des similitudes avec le PSA [39]. Cependant, l'analyse effectuée par Li et Beling a révélé que les antigènes E1 et E2 étaient spécifiques au plasma séminal humain, écartant ainsi une origine prostatique. Néanmoins, les auteurs ont également suggéré dans leur article que leur approche analytique pour déterminer la provenance de cet antigène dans le sperme pourrait avoir comporté des erreurs.

En 1978, George Sensabaugh, chercheur spécialisé en biomédecine et en sciences judiciaires, entreprenait des études sur les marqueurs potentiels présents dans le sperme. Afin de contourner les complications liées aux hommes ayant subi une vasectomie ou étant azoospermiques, il s'efforçait de trouver un marqueur protéique alternatif pouvant servir de preuve dans les affaires de viol. Ses travaux, basés sur l'électrophorèse sur gel du sperme humain, ont abouti à la découverte de deux protéines jusqu'alors inconnues, qu'il a nommées p41 et p30, correspondant à leur poids moléculaire de 41 et 30 kDa [40]. En utilisant l'anticorps fourni par Li, Sensabaugh a réussi à établir que la protéine E1 correspondait bien à p30. Cependant, à la différence de ce qu'ont observé Li et Beling, Sensabaugh a déterminé que la prostate constitue la source de l'antigène.[41]

En 1979, Wang a intégré l'équipe de recherche sur le cancer de la prostate au Roswell Park Cancer Institute à Buffalo, New York. En utilisant un antisérum nommé p8, ciblant les cellules cancéreuses prostatiques, cette équipe a réussi à purifier et à caractériser un antigène d'origine prostatique, qui fut désigné sous l'appellation PA. Leurs travaux ont révélé la présence de cet antigène dans les tissus prostatiques, qu'ils soient normaux, bénins ou malins. Des études ultérieures ont confirmé que cet antigène était spécifique à la prostate, ce qui a conduit à l'utilisation du terme plus répandu « PSA » [42].

Le PSA a été mesuré pour la première fois de manière quantitative dans le sang par Papsidero en 1980, qui a mis en évidence sa présence dans le sérum d'hommes atteints d'un cancer de la prostate métastatique. Il a également révélé

que le PSA présent dans le sérum était comparable à celui trouvé dans la prostate, le poids moléculaire du PSA dérivé du tissu prostatique étant d'environ 34 kDa, tandis que celui observé dans le sérum de ces patients atteignait 96 kDa. Par la suite, il a été établi que cette disparité était attribuable à la liaison du PSA aux protéines plasmatiques. [43]

Dans une étude marquante, Stamey et ses collègues de l'Université de Stanford ont examiné 2200 échantillons de sérum provenant de 699 patients, parmi lesquels 378 étaient atteints d'un cancer de la prostate. L'étude visait à évaluer l'efficacité du PSA en tant que marqueur tumoral. Les résultats ont révélé que les concentrations de PSA dans le sérum des patients étaient corrélées au stade du cancer de la prostate et étaient proportionnelles au volume estimé de la tumeur. Ils ont également montré que le PSA devenait indétectable dans le sérum après une prostatectomie radicale, avec une demi-vie d'environ 2 jours. Ils ont également suggéré que le PSA pourrait être un marqueur utile pour :

- Surveiller la réponse du cancer de la prostate
- Évaluer la réponse à la radiothérapie
- Servir de marqueur pour détecter une récurrence
- Évaluer la persistance de résidus tumoraux [44]

La découverte du PSA suscite des débats. Bien que Wang soit reconnu pour avoir isolé le PSA, d'autres scientifiques éminents ont également joué un rôle important dans l'étude de cet antigène. Les premières recherches sur le PSA dans le sperme visaient à explorer ses caractéristiques en tant que marqueur judiciaire

pour les cas de viol, mais son utilisation potentielle comme indicateur du cancer de la prostate s'est rapidement avérée.

### 3. Structure du PSA :

L'antigène spécifique de la prostate (PSA) est une **glycoprotéine** constituée de 237 acides aminés. Il fait partie de la famille des kallikréines, qui sont des enzymes protéolytiques responsables de la digestion des protéines. La structure du PSA est adaptée à sa fonction physiologique : c'est une sérine-protéase, une enzyme capable de cliver certaines protéines dans le liquide séminal. Le gène du PSA, désigné sous le nom de hKLK3, se trouve au sein du locus des gènes des kallikréines, situé sur le chromosome 19, précisément aux positions 19q13.3 à 19q13.4. [27,28].

Le PSA existe sous deux formes principales dans le sérum sanguin :

- **Le PSA libre**, qui circule seul dans le sang, sans être lié à d'autres protéines.
- **Le PSA lié**, qui est complexé avec des protéines plasmatiques, principalement :
  1. L'**alpha-1-antichymotrypsine (ACT)**.
  2. L'**alpha-2-macroglobuline**.

Le **PSA total** est la somme du PSA libre et du PSA lié. Ce dosage du PSA total est couramment utilisé dans la pratique clinique pour le dépistage des maladies prostatiques [26,28].

Dans un contexte physiologique normal, le PSA est sécrété en grande quantité dans le liquide séminal, avec des concentrations très élevées par rapport à celles retrouvées dans le sang. En effet, les taux sanguins de PSA sont

relativement bas chez les hommes en bonne santé, mais peuvent augmenter dans certaines conditions pathologiques [25,28].

#### 4. Fonction du PSA :

Sur le plan physiologique, le PSA facilite le clivage de plusieurs protéines synthétisées par les vésicules séminales, notamment les séminogélines I et II ainsi que la fibronectine. Ces protéines contribuent à la formation d'un gel responsable de la consistance visqueuse du sperme, un processus crucial pour la création du coagulum qui facilite la mobilité des spermatozoïdes et optimise les chances de fécondation [27].

En ce qui concerne son rôle clinique, le PSA est utilisé comme biomarqueur dans le dépistage et le suivi du cancer de la prostate. Une élévation des taux sanguins de PSA peut être un indicateur de diverses affections prostatiques, y compris le cancer de la prostate, l'hypertrophie bénigne de la prostate (HBP) et les infections prostatiques [25].

Toutefois, le PSA n'est pas un marqueur spécifique au cancer de la prostate. C'est pourquoi le **ratio PSA libre/PSA total** (Figure 23) est souvent utilisé pour affiner le diagnostic. Un faible ratio est généralement associé à un risque accru de cancer, tandis qu'un ratio élevé indique souvent une pathologie bénigne. Cela permet de réduire le nombre de biopsies inutiles tout en maintenant un bon niveau de précision dans le diagnostic [28].

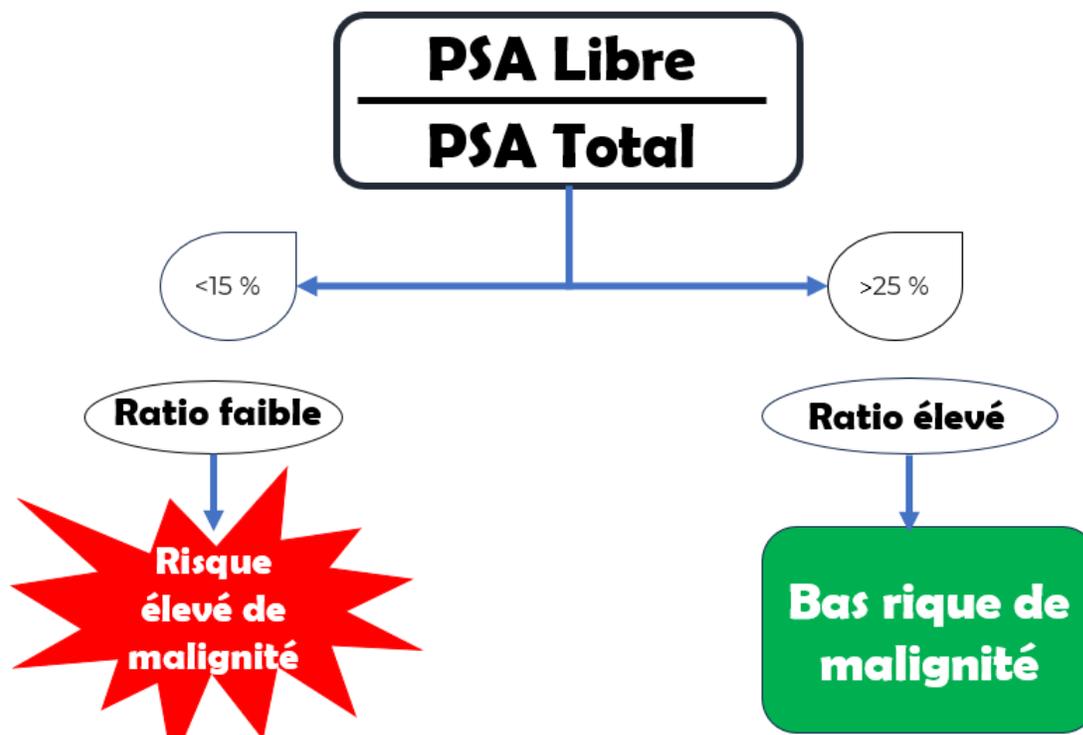


Figure 23:Ratio PSA libre/PSA total

## 5. Utilisation Clinique du PSA :

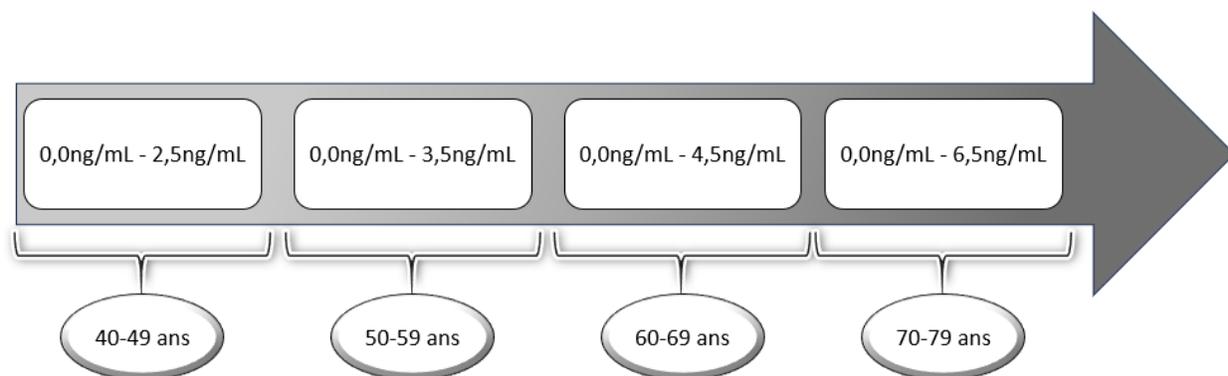
L'antigène spécifique de la prostate (PSA) est largement utilisé dans la pratique clinique pour le dépistage, le diagnostic et le suivi du cancer de la prostate. Sa mesure sérique est devenue un élément central dans la gestion des pathologies prostatiques, en particulier pour la détection précoce du cancer de la prostate. Cependant, bien que le PSA soit un outil de diagnostic important, son utilisation comporte des avantages ainsi que des limites importantes qui doivent être pris en compte dans la prise en charge des patients.

### 5.1. PSA comme outil de dépistage :

Le dosage du PSA est couramment utilisé pour dépister le cancer de la prostate chez les hommes asymptomatiques, en particulier ceux âgés de plus de

50 ans. Cette approche permet de détecter précocement des cancers à un stade localisé, où les options de traitement sont plus nombreuses et potentiellement curatives. Des niveaux de PSA dépassant 4  $\mu\text{g/l}$  peuvent nécessiter la réalisation d'une biopsie de la prostate, même en l'absence de résultats inquiétants lors de l'examen digital rectal et de l'échographie transrectale [26].

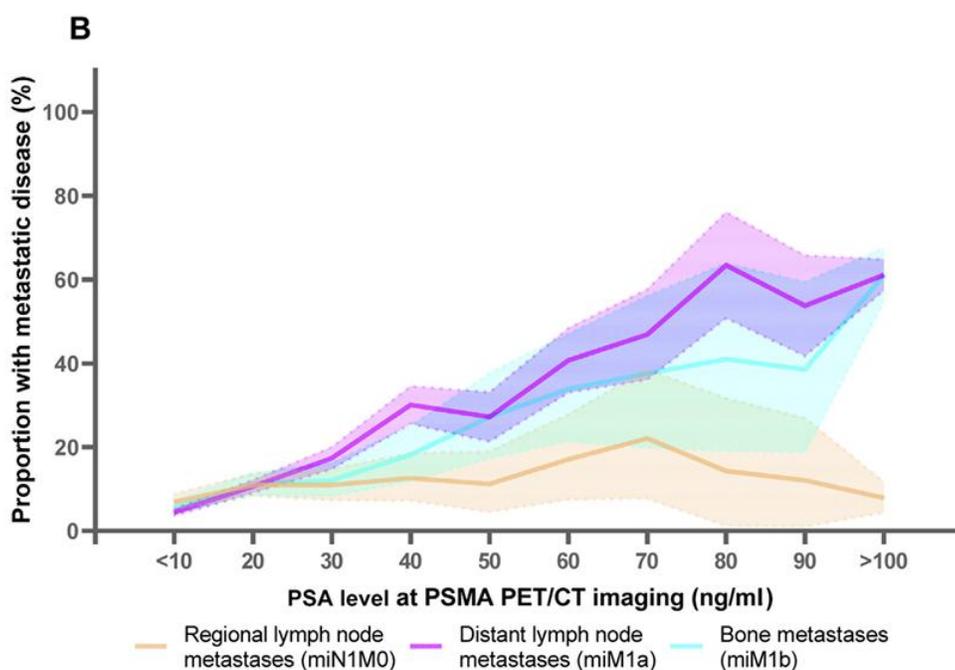
Cependant, la concentration de PSA dans le sérum est directement corrélée à l'âge du patient et au volume prostatique, ce dernier étant également directement lié à l'âge. Par conséquent, il serait plus judicieux d'établir des plages de référence adaptées à chaque tranche d'âge, plutôt que de se baser sur une seule plage pour tous les hommes, indépendamment de leur âge. De telles plages de référence spécifiques pourraient améliorer la capacité du PSA sérique à servir de marqueur tumoral pour la détection de cancers cliniquement significatifs chez les hommes âgés [32].



**Figure 24: Intervalle de référence du PSA en fonction de l'âge [56]**

Le PSA est aussi utile pour la détection de métastases prostatiques, une étude réalisée par Wietske I. Luining et ses collègues, impliquant 2193 patients diagnostiqués avec un cancer de la prostate, analyse le lien entre le taux d'antigène spécifique de la prostate et la probabilité de développer une maladie métastatique. Cette étude a utilisé la tomographie par émission de positrons et la tomodensitométrie (PET/CT) fondée sur l'antigène membranaire spécifique de la prostate (PSMA) pour le staging initial.

**Figure 25: La distribution anatomique des métastases montrée par le niveau de**



### l'antigène spécifique de la prostate (PSA) lors du staging primaire [47]

Cette étude établit une association claire entre les niveaux de PSA et la prévalence de la maladie métastatique [47].

## **6. Avantages et limites du PSA :**

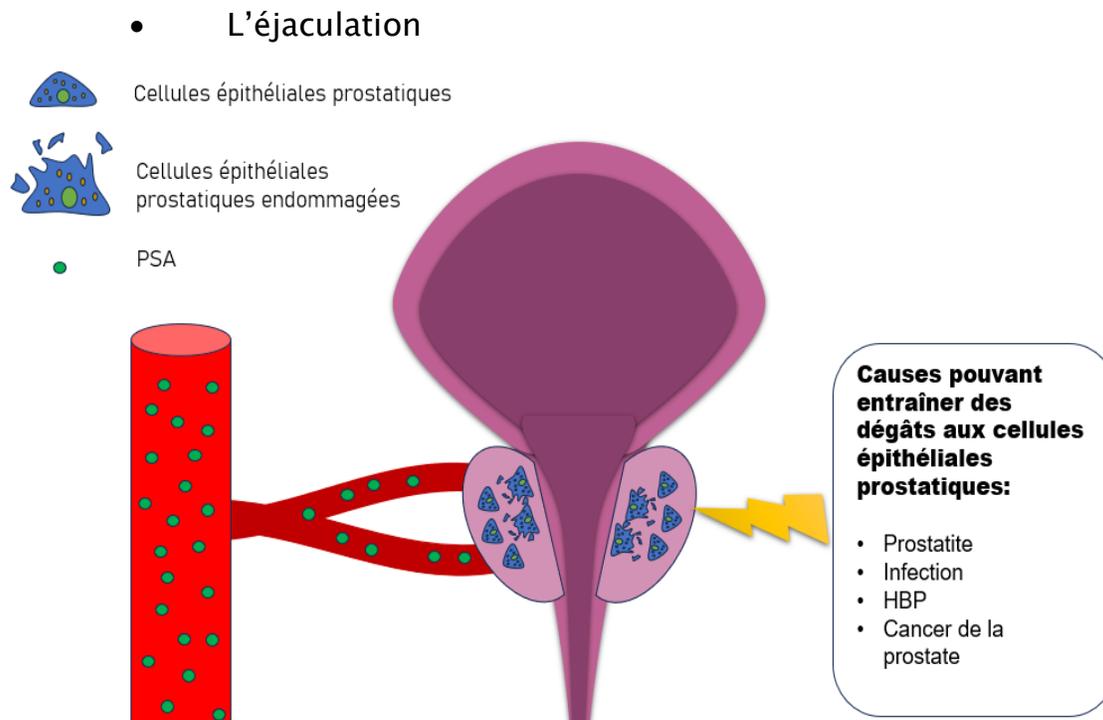
L'un des avantages majeurs du PSA est sa capacité à **détecter des cancers à un stade précoce**, avant que les symptômes n'apparaissent ou que le cancer ne devienne métastatique. Cela permet d'intervenir rapidement avec des traitements potentiellement curatifs, notamment la prostatectomie ou la radiothérapie.

Cependant, le **PSA manque de spécificité** pour le cancer de la prostate. En effet, une augmentation des taux de PSA peut être observée dans d'autres conditions bénignes telles que l'hypertrophie bénigne de la prostate (HBP) ou les prostatites. Ainsi, un taux élevé de PSA ne signifie pas automatiquement la présence d'un cancer, et des examens complémentaires, comme l'IRM multiparamétrique ou la biopsie, sont souvent nécessaires pour établir un diagnostic précis [28].

Par ailleurs, le PSA peut aussi entraîner des **faux négatifs**, en particulier dans les cas où un cancer est présent mais où les taux de PSA restent dans les limites de la normale. C'est pourquoi il est recommandé d'associer le dosage du PSA à d'autres outils diagnostiques, tels que le toucher rectal et l'imagerie, pour améliorer la sensibilité du dépistage [29].

Les faux positifs dans le dosage du PSA peuvent être provoqués par plusieurs facteurs tels que :

- L'hyperplasie bénigne de la prostate (HBP)
- La prostatite
- Une biopsie prostatique
- Un toucher rectal



**Figure 26: Causes d'élévation du PSA.**

Il est crucial de suivre des recommandations spécifiques lors de la préparation des patients pour le dosage du PSA, afin d'éviter des résultats artificiellement élevés et d'assurer l'exactitude des résultats. Ces recommandations tiennent compte des différentes interventions médicales ainsi que des événements récents pouvant influencer les niveaux de PSA dans le sérum [57].

**Tableau 1 : Recommandation des délais à respecter lors du dosage du PSA après certaines actions.**

Examen/Action	Recommandation
Toucher Rectal	Avant ou 1 semaine après
Éjaculation	Retardé de 48 heures
Biopsie par aiguille de la prostate	Retardé d'au moins 6 semaines
Résection transurétrale de la prostate	Retardé d'au moins 6 semaines
Massage prostatique	Retardé d'une semaine
TRUS	Soit avant, soit 1 semaine après
Cystoscopie rigide	Soit avant, soit 1 semaine après
Cyclisme	Avant toute période de cyclisme soutenu

### 7. Problèmes et Défis dans l'utilisation du PSA :

L'utilisation de l'antigène spécifique de la prostate (PSA) dans le dépistage, le diagnostic et le suivi du cancer de la prostate a permis des avancées importantes en termes de détection précoce et de gestion de cette maladie. Cependant, malgré ses avantages, le PSA présente plusieurs limites et défis qui affectent son efficacité et son utilisation clinique. Ces problèmes soulèvent des questions concernant la précision du PSA, sa spécificité pour le cancer de la prostate.

### **7.1. Manque de spécificité du PSA :**

L'un des principaux défis dans l'utilisation du PSA est son manque de spécificité. En effet, une élévation du PSA dans le sang ne se limite pas uniquement au cancer de la prostate. Le PSA peut également augmenter en présence de conditions bénignes telles que l'hypertrophie bénigne de la prostate (HBP), les prostatites (infections de la prostate), ou même après des manipulations mécaniques de la prostate, comme un toucher rectal ou une biopsie. Ces conditions peuvent fausser les résultats et entraîner un faux positif, incitant à effectuer des examens supplémentaires, comme des biopsies, qui peuvent s'avérer invasives et inutiles [26,28].

Des recherches sur son identification au sein de la glande de Skene (glandes para-urétrales féminines) ont été publiées dès 1984 [50], suivies en 1987 par la découverte de cet antigène dans une tumeur affectant cette même glande [51].

En plus, une recherche menée par Eleftherios P. Diamandis et ses collègues a identifié la présence de PSA à l'aide de tests ultrasensibles dans divers échantillons, notamment le lait maternel, le liquide amniotique, le liquide d'aspiration du mamelon, le liquide de kyste mammaire, le sérum féminin, le liquide céphalorachidien et la salive [52].

Des études supplémentaires ont révélé que certains tissus de cancer du poumon primaires, tant chez les hommes que chez les femmes, présentent des niveaux faibles mais mesurables de PSA [53]. D'autres types de tissus tumoraux

dans lesquels des traces de PSA ont été identifiées dans notre recherche comprennent les reins, les glandes surrénales et le côlon [54].

### **7.2. Faux négatifs et limitations dans la détection :**

Bien que l'élévation du PSA puisse signaler un risque de cancer de la prostate, il existe des situations où les taux de PSA restent normaux même en présence de la maladie. Cela peut se produire dans les formes précoces ou moins agressives du cancer de la prostate, entraînant des faux négatifs. Ainsi, un PSA normal ne garantit pas toujours l'absence de cancer, ce qui peut retarder la prise en charge et la détection des cancers cliniquement significatifs [4]. L'Institut National du Cancer (NIC) a affirmé qu'il n'y a pas de seuil précis de PSA considéré comme normal ou anormal dans le sang. Auparavant, des valeurs de PSA de 4,0 ng/mL ou moins étaient jugées normales. Toutefois, certaines personnes présentant des niveaux de PSA inférieurs à 4,0 ng/mL peuvent être atteintes d'un cancer de la prostate, tandis qu'un grand nombre d'individus ayant des niveaux de PSA compris entre 4 et 10 ng/mL ne souffrent pas de cette maladie. [46]

De plus, le dépistage du cancer de la prostate par le biais du PSA peut aboutir à un diagnostic chez des patients qui, autrement, n'auraient jamais développé de symptômes au cours de leur existence. Les traitements administrés à ces individus peuvent causer des effets néfastes sans offrir de bénéfice tangible. Ce phénomène est désigné sous le terme de surdiagnostic, et les résultats de plusieurs études randomisées indiquent qu'entre 20 % et 50 % des hommes diagnostiqués avec un cancer de la prostate suite à un dépistage pourraient en réalité être surdiagnostiqués.[45]

## **8. Optimisation des stratégies d'utilisation du PSA :**

Face à ces défis, plusieurs stratégies ont été développées pour améliorer la précision du PSA dans le diagnostic. L'utilisation du ratio **PSA libre/PSA total** est une approche qui permet d'affiner le diagnostic en distinguant les cancers de la prostate des pathologies bénignes. De plus, des avancées dans l'imagerie, telles que l'IRM multiparamétrique, permettent aujourd'hui de limiter les biopsies inutiles et de cibler les zones suspectes pour un diagnostic plus précis. Ces outils, utilisés conjointement avec le PSA, permettent d'améliorer la prise en charge des patients et de réduire les risques liés à un dépistage systématique [25].

L'optimisation de la stratégie de dépistage par le PSA doit d'abord passer par l'identification de la population cible à dépister. Un essai randomisé réalisé par C. Arsov et al. a inclus 46 642 hommes âgés de 45 ans afin d'évaluer l'efficacité d'un dépistage du PSA basé sur le risque, débutant à 45 ou 50 ans. Les résultats ont montré que la prévalence des cancers de la prostate agressifs détectés chez les hommes de 45 ans était très faible. En conséquence, il est conseillé de commencer le dépistage du PSA à partir de 50 ans [32].

De nombreuses études présentent des opinions divergentes sur l'efficacité du dépistage du cancer de la prostate chez les hommes âgés. Pour éclaircir cette problématique, une recherche dirigée par A. Grenabo Bergdahl et al. a exploré le risque de cancer de la prostate (PCa) après l'arrêt du dépistage. L'étude a inclus 20 000 hommes, avec un âge moyen de 69 ans, dans la région de Göteborg en Suède, qui ont subi un dépistage aléatoire du PSA. Les résultats ont révélé

qu'après neuf ans sans dépistage, l'incidence des cancers potentiellement mortels était similaire à celle observée chez les hommes n'ayant pas subi de dépistage. Cette étude réaffirme que le dépistage du PSA peut être interrompu chez les patients **de plus de 70 ans** [31]. Ces deux études définissent la tranche d'âge optimale pour le dépistage par PSA (à partir de 50 ans et jusqu'à 70 ans). Toutefois, d'autres facteurs individuels doivent également être pris en considération.

Les recommandations récentes de la Société américaine du cancer (ACS) suggèrent que les hommes devraient avoir la possibilité de prendre une décision informée en collaboration avec leur prestataire de soins au sujet des avantages, des risques et des incertitudes associés au dépistage du cancer de la prostate.

Suite à cette discussion, les hommes désireux de se faire dépister devraient subir un test sanguin mesurant l'antigène spécifique de la prostate (PSA) en plus d'un examen rectal digital (ERD) selon les modalités suivantes :

- **À l'âge de 50 ans** pour les hommes présentant un risque moyen, à condition qu'ils aient une espérance de vie d'au moins 10 ans.
- **À l'âge de l'âge 45 ans** pour les hommes considérés à **haut risque**, notamment les **Afro-Américains** et ceux ayant un parent au premier degré (père ou frère) ayant eu un cancer de la prostate **avant 65 ans**.
- Enfin, pour les hommes présentant un risque encore plus élevé, c'est-à-dire ceux ayant plusieurs parents au premier degré ayant eu un cancer de la prostate à un âge précoce, le dépistage doit commencer à 40 ans.

En conclusion, l'utilisation clinique du PSA présente des défis importants, notamment en ce qui concerne sa spécificité, les risques de surdiagnostic et les conséquences éthiques du dépistage systématique. Il est essentiel de continuer à développer des stratégies qui améliorent la précision du PSA, en intégrant des outils complémentaires comme l'imagerie et les biomarqueurs plus spécifiques, afin de maximiser les bénéfices pour les patients tout en minimisant les risques associés.

## **9. Nouvelles Approches et Biomarqueurs Complémentaires :**

L'évolution des connaissances médicales et des technologies a permis le développement de nouvelles approches pour améliorer la précision du diagnostic du cancer de la prostate à l'aide du PSA. Malgré ses limites, des stratégies complémentaires et des biomarqueurs innovants sont en cours d'étude pour renforcer l'efficacité de ce marqueur, tout en minimisant les risques de surdiagnostic et de surtraitement.

### **9.1. Optimisation des technologies de dépistage :**

Une des principales avancées concerne l'intégration de l'IRM multiparamétrique dans le parcours de diagnostic des patients présentant des taux de PSA élevés. Cette technologie pourrait permettre à 27 % des patients d'éviter une biopsie initiale et de diminuer de 5 % le nombre de diagnostics de cancers cliniquement insignifiants. De plus, si les biopsies guidées par échographie étaient dirigées par les résultats de l'IRM multiparamétrique, il serait envisageable d'identifier jusqu'à 18 % de cas supplémentaires de cancers

cliniquement significatifs par rapport à la méthode standard de biopsie par TRUS utilisée pour l'ensemble des patients [55].

Le suivi du PSA a également évolué. Plutôt que de se baser uniquement sur le taux absolu de PSA, les cliniciens utilisent de plus en plus la **cinétique (ou vélocité) du PSA**, c'est-à-dire la vitesse à laquelle les taux de PSA augmentent ou diminuent. Il s'agit d'un indicateur qui mesure l'évolution du taux de PSA dans le sang sur une période donnée. Cet indicateur est utilisé pour évaluer à quelle vitesse le PSA augmente au fil du temps, ce qui peut fournir des informations importantes sur l'agressivité potentielle d'une pathologie prostatique. Une élévation rapide du PSA sur une courte durée est fréquemment révélatrice d'un processus malin sous-jacent, tel qu'un cancer de la prostate en phase avancée [26].

En général, une vélocité du PSA **supérieure à 0,75 ng/mL par an** est considérée comme anormale et peut justifier des investigations plus poussées, telles qu'une biopsie prostatique ou des examens d'imagerie avancés, comme une IRM multiparamétrique. La vélocité du PSA est particulièrement utile chez les patients avec des taux de PSA modérément élevés mais stables, car elle permet de mieux identifier ceux qui sont à risque de développer un cancer agressif. Par exemple, même si le PSA est inférieur à la limite de 4 ng/mL, une augmentation rapide sur plusieurs mois ou années peut être un signe avant-coureur d'un cancer, nécessitant une surveillance plus fréquente ou des interventions supplémentaires [30].

Il est important de noter que certains facteurs peuvent influencer la vélocité du PSA, notamment des événements transitoires tels que des infections urinaires, des inflammations prostatiques (prostatite) ou des manipulations médicales récentes comme des biopsies ou des touchers rectaux. Ces événements peuvent provoquer une augmentation temporaire du PSA, et il est donc essentiel de prendre en compte ces facteurs avant d'interpréter les résultats de la vélocité du PSA [26].

La vélocité du PSA est souvent utilisée en combinaison avec d'autres biomarqueurs, tels que la densité de PSA ou le ratio PSA libre/total, pour fournir une évaluation plus complète du risque de cancer de la prostate et ainsi éviter les faux positifs et les interventions inutiles [28].

### 9.2. Nouveaux biomarqueurs complémentaires :

Face aux limites du PSA, plusieurs biomarqueurs complémentaires sont en cours d'évaluation pour améliorer la spécificité du dépistage et affiner le diagnostic du cancer de la prostate. Parmi ces biomarqueurs, le **PCA3 (Prostate Cancer Antigen 3)** est un gène non codant dont l'expression est spécifique aux cellules cancéreuses de la prostate. Son dosage dans les urines après massage prostatique est prometteur pour identifier les cancers nécessitant un traitement, notamment lorsque les résultats du PSA sont indéterminés [27].

Les isoformes du PSA, telles que le **pro-PSA** et le **BPSA**, sont également en cours de recherche pour améliorer la détection des cancers agressifs. Le pro-PSA est une forme précurseur du PSA mature, et son élévation semble corrélée aux cancers à haut risque. Ces nouveaux marqueurs pourraient, à terme, remplacer

ou compléter le PSA dans le diagnostic des cancers cliniquement significatifs, réduisant ainsi le recours aux biopsies inutiles [27,28].

Par ailleurs, des technologies de tests génétiques et moléculaires permettent aujourd'hui d'évaluer le risque de cancer chez certains patients, en fonction de leur profil génétique et de l'expression de certains gènes liés à la progression tumorale. Ces nouvelles approches offrent une voie prometteuse pour personnaliser les traitements et limiter les effets indésirables des interventions thérapeutiques [25].

### **10. Conclusion :**

L'antigène spécifique de la prostate (PSA) a marqué un tournant dans le dépistage et la gestion du cancer de la prostate depuis son adoption dans les années 1980. Utilisé à grande échelle, le PSA a permis d'améliorer le diagnostic précoce du cancer de la prostate, permettant ainsi d'augmenter les chances de guérison par des traitements précoces. Cependant, son manque de spécificité et les risques associés au surdiagnostic et au surtraitement ont soulevé de nombreux défis cliniques et éthiques [28,29].

Les nouvelles technologies, telles que l'IRM multiparamétrique, combinées à des biomarqueurs innovants comme le PCA3 et le pro-PSA, ouvrent des perspectives prometteuses pour améliorer la précision du diagnostic et réduire les interventions inutiles. L'intégration de ces outils dans la pratique clinique, en complément du PSA, offre la possibilité d'affiner les stratégies de dépistage, en évitant les faux positifs et en se concentrant sur les cancers à haut risque.

Dans le futur, la recherche devra se concentrer sur l'identification de biomarqueurs encore plus spécifiques et sur l'amélioration des algorithmes de décision clinique. L'objectif est de parvenir à une médecine plus personnalisée, où chaque patient recevra un traitement adapté à son profil biologique, minimisant ainsi les risques de surdiagnostic tout en maximisant les chances de détection précoce des cancers agressifs. Les progrès dans ce domaine permettront de répondre aux enjeux actuels liés à l'utilisation du PSA, tout en optimisant la qualité des soins pour les patients atteints de cancer de la prostate [25,27].

## **II. Le toucher rectal**

### **1. Introduction :**

Depuis longtemps, le toucher rectal (TR) joue un rôle essentiel dans l'évaluation clinique de la prostate, en particulier pour détecter et diagnostiquer précocement le cancer de la prostate. Même si certains patients le considèrent comme invasif et que sa popularité a diminué avec l'apparition de nouvelles méthodes diagnostiques, le tr reste un élément indispensable du bilan urologique. Différentes recherches ont étudié son rôle, son efficacité et ses limites dans le dépistage de la prostate, en le comparant à d'autres outils tels que le dosage de l'antigène prostatique spécifique (PSA) et l'échographie transrectale (TRUS).

## 2. Utilité clinique du toucher rectal :

Le TR offre au médecin la possibilité de repérer des anomalies physiques dans la prostate dont :

- Des nodules
- Une asymétrie
- Une Consistance anormale

Toutefois, la capacité de cet examen à repérer une tumeur varie selon l'examineur en raison de sa nature subjective et des caractéristiques cliniques différentes. Cupp et al. ont démontré que le TR, bien qu'efficace pour détecter certaines tumeurs, surtout si associé au PSA. En effet, cette combinaison permet fréquemment de détecter des tumeurs distinctes, ce qui justifie une approche combinée afin d'améliorer le dépistage la détection précoce des cancers de la prostate [61].

Une étude menée en 2017 par Yamamoto et ses collègues a montré que le TR peut prédire avec une grande précision les volumes prostatique supérieurs à 30 mL, un seuil important pour identifier les patients à risque de progression de l'hypertrophie bénigne de la prostate.

Toutefois, l'étude a mis en évidence que pour les prostatites **légèrement** agrandies, le TR seul peut être inefficace, et des explorations supplémentaires sont indispensables pour une évaluation précise du volume [59].

### **3. Le rôle pronostique du toucher rectal dans le cancer de la prostate :**

Une autre étude importante a été réalisée en 2019 par Borkenhagen et al. portant sur la valeur prédictive du toucher rectal (TR) dans la stratification du risque chez les patients atteints de cancer de la prostate de stade T2.

Les résultats ont révélé que les sous-catégories cliniques de la classification T2 (cT2a, cT2b, cT2c) fondées sur le TR sont étroitement associées à la survie globale des patients, mettant en lumière l'importance de cet examen comme outil pronostique dans un cadre clinique contemporain. Malgré l'avènement de tests diagnostiques sophistiqués et onéreux, le TR demeure un instrument accessible et essentiel pour anticiper les résultats cliniques des patients [58].

L'étude souligne que, malgré l'apport des techniques comme l'IRM multiparamétrique pour optimiser la détection des cancers de la prostate, le toucher rectal (TR) demeure essentiel en raison de son coût modique et de sa facilité d'accès. En effet, lorsque le TR est associé à des niveaux de PSA anormaux, il contribue significativement à l'identification des cancers [58].

### **4. Limitations et défis du toucher rectal :**

Bien que le TR soit un outil utile, son emploi comporte des restrictions, en particulier en raison de sa subjectivité et des différences observées entre les examinateurs. Une analyse de la littérature réalisée par Stone et al. (2016) indique que le TR présente une corrélation modérée avec le volume prostatique évalué par échographie transrectale (TRUS) (coefficient de corrélation de 0,32) ce qui

limite son utilité clinique en tant qu'outil **autonome** pour estimer le volume prostatique ou évaluer les symptômes urinaires [60].

Toutefois, l'étude réalisée par Cupp et al. a mis en évidence que pour les prostates **légèrement** agrandies, le TR seul peut être inefficace, et des explorations supplémentaires sont indispensables pour une évaluation précise du volume [61].

En conclusion, bien que le toucher rectal présente certaines limites, il demeure un élément essentiel dans le dépistage du cancer de la prostate. Son association avec d'autres méthodes diagnostiques, telles que le dosage du PSA et l'échographie, contribue à affiner la précision du diagnostic et à mieux évaluer le risque chez les patients. Dans le cadre de la santé publique, le toucher rectal continue d'occuper une position importante en tant que méthode de dépistage à la fois accessible et efficace, surtout lorsqu'il est intégré dans une approche multimodale pour le dépistage et le traitement du cancer de la prostate.

### **III. L'échographie**

#### **1. Introduction :**

Depuis son introduction dans les années 1950, l'échographie a connu une évolution spectaculaire dans le domaine médical. Initialement utilisée pour des examens obstétricaux, cette technologie a rapidement trouvé des applications dans de nombreuses autres spécialités, notamment en urologie. L'échographie prostatique, plus spécifiquement l'échographie transrectale (TRUS), a émergé dans les années 1980 comme une méthode essentielle pour l'évaluation de la prostate et la réalisation de biopsies ciblées [66].

Au fil des décennies, cette technique a évolué, incorporant des innovations telles que l'échographie Doppler, l'échographie avec contraste et plus récemment, le micro-échographie haute résolution, augmentant ainsi la précision et la fiabilité du diagnostic des pathologies prostatiques, notamment le cancer de la prostate.

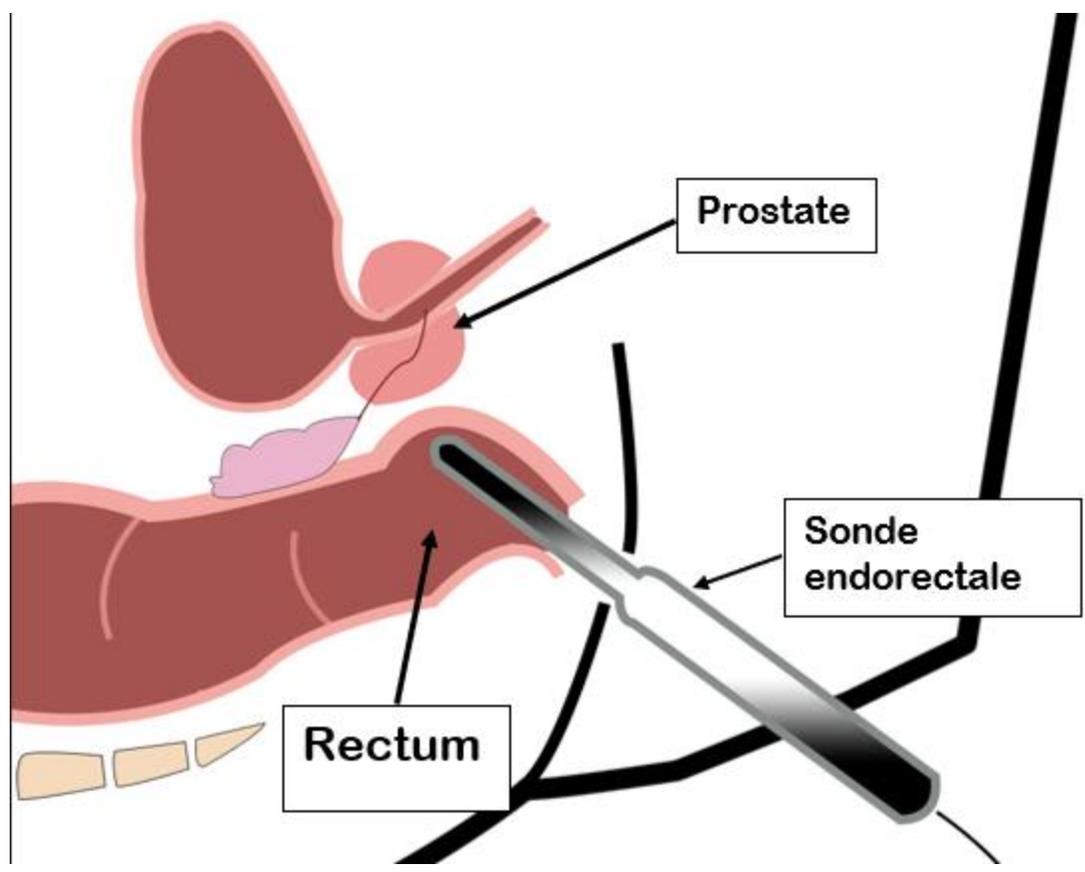
En comparaison avec d'autres méthodes d'imagerie comme l'IRM (MRI), l'échographie présente plusieurs avantages :

- Abordabilité,
- Disponibilité,
- Permet une visualisation en temps réel.

Cependant, l'IRM est souvent préférée pour les cas plus complexes en raison de sa capacité à mieux différencier les tissus. Ce chapitre se propose d'explorer les innovations dans le domaine de l'échographie prostatique, en mettant en lumière ses applications cliniques actuelles et ses avantages par rapport à d'autres techniques d'imagerie.

## **2. Bases de l'échographie transrectale (TRUS) :**

L'échographie transrectale (TRUS) est une technique couramment utilisée pour l'évaluation de la prostate, surtout dans le cadre du diagnostic des maladies prostatiques. Cette technique consiste à insérer une sonde d'échographie dans le rectum du patient, offrant ainsi une visualisation directe et en temps réel de la glande prostatique.



**Figure 27:L'échographie transrectale**

L'un des principaux avantages de la TRUS est sa capacité à fournir des images précises à un coût relativement faible et avec une disponibilité immédiate, contrairement à d'autres techniques d'imagerie [62].

Depuis son introduction en 1968, l'imagerie transrectale en mode B a considérablement évolué grâce à l'application de sondes à fréquence plus élevée et à l'amélioration des techniques de réception des signaux, offrant des images plus détaillées et précises des structures prostatiques. Cela a permis d'améliorer l'identification des zones suspectes dans la prostate, notamment celles associées à des cancers, et de guider efficacement les biopsies. [68]

En 1989, **Hodge et ses collègues** ont mis en place le protocole de biopsie sextante systématique assistée par échographie transrectale (TRUS). Depuis cette époque, divers protocoles ont été développés, et il est actuellement conseillé d'effectuer un minimum de 10 à 12 biopsies systématiques de la zone périphérique en tant que stratégie de première intention [67].

La TRUS se distingue par sa rapidité et sa capacité à fournir des images en temps réel, en faisant un outil privilégié pour guider des interventions telles que les biopsies prostatiques. Cependant, elle présente certaines limites, notamment dans la différenciation entre tissus sains et tissus malins, le cancer de la prostate pouvant adopter diverses apparences échographiques. De plus, certaines petites lésions cancéreuses, iso-échogènes, peuvent échapper à la détection visuelle directe [66].

Une étude réalisée par F. May et ses collègues a impliqué 54 patients atteints d'un cancer de la prostate confirmé par biopsie. Tous les patients ont subi une échographie par voie rectale (TRUS) en plus d'une imagerie par résonance magnétique (IRM) avant une prostatectomie radicale.

L'objectif de l'étude était d'évaluer l'extension extra-capsulaire et l'invasion des vésicules séminales avant l'opération, en comparant les résultats des deux techniques avec ceux de l'analyse histopathologique après la chirurgie.

Les données recueillies ont révélé que l'échographie TRUS présentait une précision globale de 63%, alors que l'IRM se distinguait par une meilleure capacité à évaluer le stade local du cancer, atteignant une exactitude de 93% pour un radiologue et de 56 % pour un autre. Cependant, l'échographie TRUS a montré

une spécificité plus élevée dans l'identification de l'extension extra-capsulaire et de l'invasion des vésicules séminales par rapport à l'IRM, ce qui suggère une efficacité accrue pour réduire les faux positifs dans la détection de ces extensions extra-prostatiques.

Cette recherche met en évidence l'**utilité restreinte** de l'échographie TRUS dans l'élaboration des stratégies thérapeutiques pour les cancers localisés de la prostate, et suggère qu'il est inapproprié de fonder les choix thérapeutiques uniquement sur les résultats obtenus par TRUS [69].

C'est pourquoi des techniques avancées, telles que l'échodoppler ou l'échographie avec contraste, sont souvent utilisées en complément pour améliorer la précision diagnostique [62].

### **3. Techniques avancées en échographie prostatique :**

#### **3.1. Échographie Doppler couleur et Échographie avec contraste (CEUS) :**

L'échographie Doppler couleur est une technique avancée qui permet de visualiser en temps réel le flux sanguin dans la prostate. Cette méthode est particulièrement utile pour l'évaluation des tumeurs prostatiques qui sont souvent associés à une augmentation de la vascularisation due à l'angiogenèse tumorale. Le Doppler couleur met en évidence ces variations du flux sanguin en visualisant la micro-vascularisation, ce qui aide à identifier les zones suspectes de malignité dans la prostate [62].

Contrairement à l'échographie standard en mode B, qui montre uniquement les différences de densité des tissus, le Doppler couleur ajoute une dimension fonctionnelle en mesurant le mouvement du sang dans les vaisseaux

sanguins. Ainsi, les zones suspectes, telles que les tumeurs cancéreuses, apparaissent souvent avec une **augmentation importante du flux sanguin**, ce qui permet une détection de la néovascularisation tumorale de manière plus précise [66]. Plusieurs études ont dévoilé le rôle de l'échographie Doppler dans la détection des cancers par rapport à la TRUS seule [70,71,72]

En outre, l'échographie Doppler couleur peut être combinée avec d'autres techniques, telles que l'échographie avec contraste (CEUS), afin d'améliorer la détection. Des microbulles, composées d'une enveloppe lipidique ou de galactose et remplies d'un gaz inerte, d'un diamètre allant de 1 à 10  $\mu\text{m}$ , sont administrées par voie intraveineuse. Ces microbulles agissent comme agents de contraste en échographie, facilitant la visualisation du flux sanguin dans les micro-vaisseaux, en particulier dans les zones difficiles à évaluer avec les techniques conventionnelles [66]

Des études ont montré que l'utilisation de CEUS, associée à une biopsie ciblée, augmentait la détection des cancers significatifs par rapport aux biopsies systématiques [72,73,74].

Une recherche effectuée en Autriche a impliqué 100 participants présentant un taux de PSA élevé, dans le cadre d'une étude visant à évaluer l'efficacité comparative de la biopsie ciblée avec agent de contraste par rapport à la biopsie systématique (BS). La biopsie ciblée, réalisée grâce à l'agent de contraste SonoVue1, a consisté en la collecte de cinq carottes dans des zones identifiées par une hypervascularisation.

Les résultats révèlent que le cancer a été diagnostiqué chez 32 % des participants par le biais de la biopsie ciblée, tandis que ce chiffre diminue à 26 % pour la biopsie systématique, ce qui démontre une supériorité significative de la méthode ciblée. [12]

Les agents de contraste ultrasonores les plus couramment utilisés dans le cancer de la prostate (PCa) sont Levovist (Schering, Allemagne) et SonoVue (Bracco, Italie)(Figure 28). Différentes techniques de réception du signal peuvent être employées pour la détection des agents de contraste, notamment le séquençage d'impulsions à contraste de cadence (CPS) et la technologie d'imagerie des microvaisseaux (MVI). L'application de l'imagerie Doppler conventionnelle améliorée par des microbulles est fréquemment rapportée dans la littérature.



**Figure 28: Produits de contraste pour CEUS Levovist et SonoVue**

Malgré ses nombreux avantages, l'échographie Doppler couleur présente certaines limitations. Son efficacité dépend de la compétence de l'opérateur et de la qualité de l'appareil utilisé. De plus, elle peut parfois manquer de sensibilité pour détecter les petites lésions, en particulier celles qui ne présentent pas une vascularisation significative. C'est pourquoi elle est souvent utilisée en complément d'autres méthodes d'imagerie, comme l'IRM ou l'échographie avec contraste, pour optimiser le diagnostic et la stadification du cancer de la prostate [66].

En conclusion, l'échographie Doppler couleur est un outil précieux dans le diagnostic du cancer de la prostate. En visualisant la vascularisation anormale, elle permet de cibler plus efficacement les biopsies et d'améliorer la précision du diagnostic, tout en étant complémentaire à d'autres techniques d'imagerie.

### **3.2. Élastographie en temps réel :**

#### **3.2.1 Principe de l'élastographie en temps réel :**

L'élastographie en temps réel est une technologie d'imagerie médicale avancée qui permet d'évaluer la rigidité des tissus en mesurant les déformations mécaniques sous l'effet d'une pression externe. Cette technique repose sur le principe que les tissus cancéreux sont généralement plus rigides que les tissus sains. En détectant les variations d'élasticité, l'élastographie identifie les régions potentiellement malignes sans recourir à des agents de contraste [66]. Ce principe fait de l'élastographie une méthode non invasive, particulièrement précieuse dans le cadre de la détection des cancers prostatiques cliniquement significatifs (csPCa).

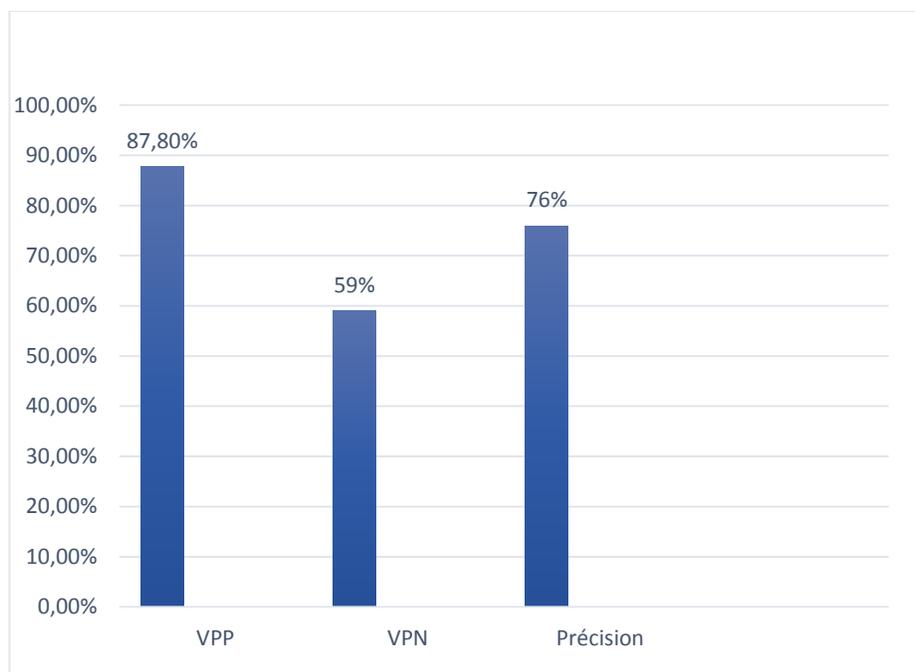
Contrairement aux échographies classiques, qui se concentrent principalement sur l'échogénicité des tissus, l'élastographie offre des informations fonctionnelles, basées sur les caractéristiques mécaniques des structures tissulaires. Cela permet une meilleure différenciation entre tissus pathologiques et sains. [65]

### 3.2.2. Avantages et limites :

L'un des principaux avantages de l'élastographie en temps réel réside dans son caractère non invasif et l'absence d'agents de contraste, ce qui réduit les risques pour les patients et permet une réalisation rapide de l'examen en consultation. Cette technique est particulièrement utile pour cibler les biopsies sur les zones suspectes identifiées par l'augmentation de la rigidité des tissus, ce qui améliore la précision des prélèvements [66].

Salomon et al. ont mené une recherche entre juillet et octobre 2007, impliquant 109 patients diagnostiqués avec un cancer de la prostate localisé et confirmé par biopsie, ces patients ont bénéficié d'une élastographie avant de procéder à une prostatectomie radicale,

Au total, **439 zones** suspectes ont été identifiées lors de l'élastographie, tandis que **451 zones** cancéreuses ont été détectées dans les échantillons de prostatectomie. Les résultats ont montré une sensibilité de 75,4% et une spécificité de 76,6 %.



### Graphique 1: Résultats de l'étude de Salomon et al. sur l'élastographie

Ces résultats indiquent que l'élastographie est capable de détecter des foyers de cancer de la prostate avec une précision satisfaisante et pourrait potentiellement améliorer la détection du PCa par échographie [76].

L'élastographie en temps réel est également utilisée dans la stadification des tumeurs prostatiques. En fournissant des informations précises sur l'étendue et la rigidité des lésions, elle permet de mieux évaluer l'agressivité du cancer et d'orienter les décisions thérapeutiques [4]. Les urologues peuvent ainsi planifier des traitements plus adaptés en fonction des caractéristiques spécifiques de chaque patient.

Cependant, l'élastographie présente **certaines limites**. Son efficacité dépend de l'opérateur et de la qualité des équipements utilisés. Une autre contrainte réside dans le fait que l'hyperplasie bénigne et la prostatite atrophique chronique peuvent simuler des tissus durs, ce qui peut conduire à des résultats

faussement positifs. Une étude réalisée par Leo Pallwein et al. sur 492 volontaires dépistés par PSA, ayant un PSA total  $> 1,25$  ng/mL et un rapport PSA libre/total  $< 18$  %, Ces volontaires ont subi une sonoélastographie de la prostate avant de procéder à une biopsie systématique comportant 10 carottes. L'analyse de l'élasticité tissulaire a été exclusivement réalisée sur la zone périphérique. La plupart des résultats faussement positifs (**51,6 %**) étaient associés à **une inflammation chronique** ou à une atrophie, en particulier dans les zones basales de la prostate [77].

### 3.2.3. Perspectives futures :

L'avenir de l'élastographie en temps réel se dessine autour de son intégration avec d'autres technologies d'imagerie. La fusion d'images IRM-écho, associant ainsi la résolution spatiale élevée de l'IRM aux données fonctionnelles offertes par l'élastographie, pourrait renforcer la précision des biopsies guidées ainsi que des diagnostics [66].

En outre, des travaux de recherche visent à développer des systèmes automatisés capables d'analyser les données d'élastographie de manière plus objective, minimisant ainsi la dépendance à l'expertise de l'opérateur et rendant les résultats plus reproductibles [63].

## 4. Innovations récentes : l'échographie haute résolution (micro-échographie) :

### 4.1 Présentation de la technologie :

La micro-échographie haute résolution (mUS) est une innovation de pointe dans le domaine de l'imagerie prostatique, exploitant des fréquences ultrasonores élevées de l'ordre de **29 MHz**, bien supérieures aux fréquences utilisées dans les échographies conventionnelles. Cette fréquence offre une résolution spatiale d'environ 70 microns, représentant une avancée significative qui facilite l'observation détaillée des structures tissulaires [62].

La micro-échographie haute résolution présente plusieurs avantages notables : sa disponibilité immédiate en clinique permet des **diagnostics rapides, en temps réel**, sans recourir à des examens plus longs et coûteux comme l'IRM. De plus, **son coût réduit** en fait une alternative accessible dans la prise en charge du cancer de la prostate.

### 4.2 Comparaison avec l'IRM multiparamétrique :

La micro-échographie haute résolution (mUS) a démontré une sensibilité et spécificité supérieures à l'IRM multiparamétrique pour la détection du cancer prostatique cliniquement significatif (csPCa) chez les patients ayant des biopsies négatives.

Une étude rétrospective effectuée entre 2017 et 2020 sur un échantillon de 304 patients, réalisée par l'Université Humanitas en Italie, visait à évaluer et à comparer l'exactitude diagnostique du micro-ultrason (mUS) et de l'IRM

multiparamétrique (mpMRI) pour la détection du cancer de la prostate chez des participants ayant des antécédents de biopsies prostatiques négatives.

**Tableau 2 : Comparaison entre mUS et IRMmp**

	mUS	IRMmp
<u>Sensibilité</u>	91,2 %	77.2%
Spécificité	22,2 %	24,4 %
<u>VPN</u>	66,7 %	45,8 %
VPP	56,4 %	59,8 %

Les résultats ont révélé une **sensibilité nettement supérieure** de 91,2 % pour la micro-échographie (mUS) dans la détection des csPCa, en comparaison à 77.2% pour le IRMmp. De plus, le mUS a démontré une valeur prédictive négative (VPN) de 66,7 %, surpassant celle de l'IRM multiparamétrique (45,8 %). Cependant, les deux méthodes ont affiché une spécificité relativement faible, avec 22,2 % pour le mUS et 24,4 % pour l'IRM multiparamétrique. Enfin, la valeur prédictive positive (VPP) a été légèrement plus élevée pour l'IRM multiparamétrique (59,8 %) par rapport au mUS (56,4 %) [62].

## **5. Conclusion :**

Les avancées technologiques dans l'échographie prostatique, notamment le Doppler couleur, l'échographie avec contraste, l'élastographie en temps réel et la micro-échographie haute résolution, ont considérablement amélioré le diagnostic du cancer de la prostate. Ces innovations permettent un diagnostic

plus précoce et une prise en charge plus personnalisée des patients, en réduisant la nécessité de recourir systématiquement à des techniques plus coûteuses comme l'IRM. À l'avenir, l'échographie devrait s'intégrer davantage dans les protocoles cliniques, que ce soit pour remplacer ou compléter l'IRM, renforçant ainsi son rôle dans la gestion du cancer de la prostate.

## **IV. L'imagerie par Résonance Magnétique (IRM)**

### **1. Introduction :**

L'IRM (Imagerie par Résonance Magnétique) s'est progressivement imposée comme une technique incontournable dans le domaine de la radiologie et plus particulièrement pour l'étude de la prostate. Elle repose sur un principe physique relativement complexe mais non invasif, utilisant les propriétés des noyaux atomiques, principalement ceux de l'hydrogène, pour capter et reconstruire des images tridimensionnelles précises. Lorsque ces noyaux sont exposés à un champ magnétique puissant et à des impulsions de radiofréquences, ils émettent des signaux qui, une fois traités, permettent de visualiser les tissus internes du corps.

Dans les années 1980, l'utilisation de l'IRM pour la prostate se limitait essentiellement aux séquences pondérées en T1 et T2. Bien que prometteuse à l'époque, cette technologie initiale ne présentait pas une précision diagnostique suffisante, notamment en termes de sensibilité et de spécificité, pour la détection fiable des pathologies prostatiques [79]. En effet, ces premières images ne permettaient pas de distinguer clairement les tumeurs agressives des lésions

bénignes, limitant ainsi l'intérêt de l'IRM comme outil diagnostique standard dans la pratique clinique.

Cependant, au fil des décennies, les progrès technologiques ont conduit à l'émergence de l'IRM multiparamétrique (IRMmp), qui a révolutionné l'évaluation du cancer de la prostate. Cette méthode combine plusieurs séquences d'imagerie, telles que l'imagerie pondérée en diffusion (DWI), l'imagerie dynamique après injection de produit de contraste (DCE), et les séquences classiques en T1 et T2. Grâce à cette approche, l'IRMmp permet non seulement de mieux identifier les tumeurs cliniquement significatives, mais elle aide également à réduire le risque de surdiagnostic de cancers indolents, c'est-à-dire de formes de la maladie qui ne nécessitent pas de traitement agressif.

Aujourd'hui, l'IRMmp est largement considérée comme un outil essentiel pour le dépistage, le suivi et la planification du traitement du cancer de la prostate, jouant ainsi un rôle crucial dans la médecine de précision moderne. L'IRMmp, qui combine plusieurs séquences d'imagerie, offre une meilleure précision que les approches traditionnelles, comme la mesure du PSA seule ou les biopsies aléatoires. Ce chapitre explore les principes de l'IRM, son fonctionnement, et son impact sur la gestion clinique du cancer de la prostate.

## **2. Principes de l'IRM Prostatique multiparamétrique :**

L'IRM multiparamétrique (IRMmp) est une technique avancée d'imagerie qui combine plusieurs séquences d'IRM pour fournir une visualisation détaillée de la prostate, permettant une détection plus précise des cancers cliniquement significatifs (csPCa).

Cette approche repose sur l'utilisation de différentes séquences, chacune ayant un rôle spécifique dans l'analyse des tissus prostatiques. Les principales séquences utilisées dans l'IRMmp sont :

- L'imagerie pondérée en T2
- L'imagerie par diffusion (DWI)
- L'imagerie dynamique avec injection de contraste (DCE) [78,80].

### 2.1 Imagerie Pondérée en T2 :

L'imagerie pondérée en T2 est la **séquence standard** qui permet d'obtenir des images à haute résolution de l'anatomie de la prostate et permet de distinguer la zone périphérique de la prostate, où la majorité des cancers se développent, de la zone transitionnelle.

Elle permet une distinction remarquable entre les diverses zones de la prostate, facilitant ainsi l'identification des anomalies morphologiques. La zone périphérique normale se caractérise par une intensité de signal variant de moyenne à élevé en raison de sa richesse en eau. En revanche, la présence d'un cancer dans cette région se traduit par une intensité de signal réduite, conséquence de l'augmentation de la densité cellulaire. [79]

Cependant, cette observation manque de spécificité et peut entraîner des faux positifs dus à :

- Une prostatite
- Une hémorragie,
- Des tissus cicatriciels
- Une fibrose

- Suite d'un traitement [78]

La zone transitionnelle (ZT) se caractérise par une intensité intermédiaire uniforme, qui devient hétérogène lors de l'apparition d'une hyperplasie bénigne de la prostate (HBP). Cette hétérogénéité complique la détection d'un cancer et engendre une confusion entre ces deux affections, quand même l'imagerie pondérée en T2 et considérée plus fiable pour l'étude de cette zone [78,80].

### 2.2 Imagerie par Diffusion (DWI) :

L'imagerie par diffusion (DWI) repose sur l'utilisation d'un champ magnétique intense et d'impulsions de radiofréquence pour évaluer la diffusion des molécules d'eau au sein des tissus. Le mouvement de l'eau varie selon la nature des tissus sains et le type de processus pathologique en cours. En raison de la forte densité cellulaire, de la diminution relative de la quantité d'eau et de la perturbation des espaces interstitiels ainsi que des voies par lesquelles l'eau circule normalement, le cancer de la prostate se caractérise par une diffusion de l'eau réduite par rapport aux tissus prostatiques sains [79].

La DWI est particulièrement efficace pour distinguer les cancers des tissus bénins et joue un rôle clé dans la détection des cancers cliniquement significatifs [80].

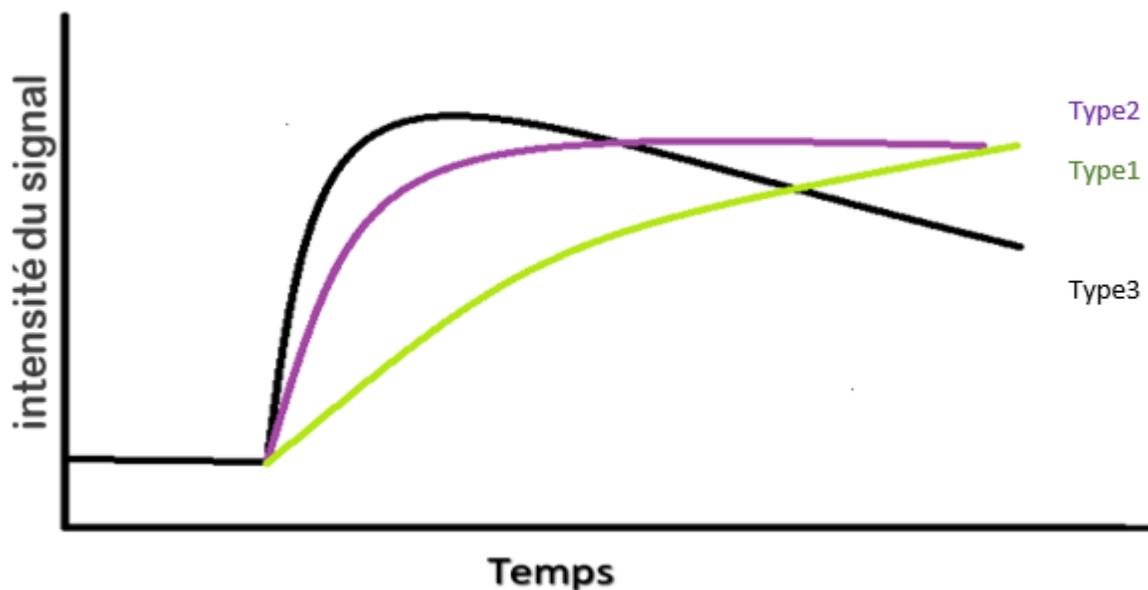
Toutefois, la précision spatiale de l'imagerie par diffusion est limitée. Elle doit donc être associée à l'imagerie pondérée en T2 (T2WI). Différentes recherches ont montré que la DWI associée à la T2WI permet d'obtenir un diagnostic plus précis que la T2WI seule. [86,87,88]

### **2.3 Imagerie Dynamique avec Injection de Contraste (DCEI) :**

L'imagerie dynamique par résonance magnétique avec contraste (DCEI: Dynamic Contrast-Enhanced Imaging) implique l'administration intraveineuse d'un bolus de gadolinium, suivie d'une série de scans rapides et successifs réalisés à des intervalles de temps réduits. Chaque scan génère une représentation de la perfusion dans les différentes zones de la prostate à un instant donné. [79]

Les chélates de gadolinium (Gd) sont des agents de contraste extracellulaires couramment utilisés en imagerie médicale. Après une injection intraveineuse en bolus dans la veine médiane cubitale, cet agent traverse le cœur et les poumons avant d'entrer dans le système artériel. Bien qu'il subisse une dilution, l'agent de contraste parvient à pénétrer dans le système artériel et atteindre la prostate. Pendant la phase initiale de son passage, la différence de concentration entre les compartiments intra- et extravasculaires atteint son maximum, facilitant ainsi un transfert rapide des vaisseaux vers les tissus. Le produit de contraste, présent dans les capillaires et l'espace interstitiel, provoque une augmentation de l'intensité du signal sur les images pondérées en T1. Il entre par la suite dans une phase stable, suivie d'une diminution. Ce phénomène de lavage résulte de la réduction de la concentration du produit de contraste dans les vaisseaux, due à son absorption par les tissus et à son élimination par les reins.[86]

La perfusion d'une région d'intérêt (c'est-à-dire une zone suspecte sur les séquences T2WI ou DWI) peut être représentée graphiquement en fonction du temps pour créer une courbe perfusion/temps [79], on peut avoir 3 types de courbes :



Graphique 2:Types de courbes intensité/temps

- Le **tissu normal** présente une courbe diffuse de type 1 (VERT), dans laquelle une élévation et un lavage progressives du contraste sont observés à travers toute la glande.
- L'**hyperplasie bénigne de la prostate (HBP)** et la **prostatite** se manifestent par une courbe de type 2 (mauve), diffuse ou multifocale, caractérisée par une élévation précoce et intense suivie d'un lavage lent du contraste ; des **tumeurs de bas grade**, peu denses ou multifocales, peuvent également présenter ce type de courbe.

- Les courbes de type 3 (**noir**) sont caractéristiques des **tumeurs de haut grade**, avec une élévation précoce et intense du contraste suivie d'un lavage rapide., avec une amélioration précoce et intense du contraste suivie d'un lavage rapide.

Néanmoins, une étude réalisée par Hansford et ses collègues a montré que l'analyse qualitative des courbes temps–signal en imagerie par résonance magnétique dynamique (IRM DCE) présente des performances limitées pour distinguer le cancer de la prostate (PCa) des tissus prostatiques normaux. De plus, l'accord entre les observateurs est jugé excellent uniquement pour les courbes de type 3, tandis qu'il demeure faible pour les courbes de type 1 et 2. [83]

En raison de ces contraintes, sa fonction a été diminuée dans les dernières éditions des recommandations PI–RADS. Cependant, elle reste essentielle pour valider la malignité des lésions et pour surveiller l'évolution post–thérapeutique. [78,80].

#### **2.4 Utilisation Complémentaire des Séquences :**

Chaque séquence employée dans l'IRMmp contribue à enrichir les données nécessaires à l'analyse des lésions prostatiques :

- **L'imagerie pondérée en T2** offre une représentation anatomique précise et permet de distinguer les différentes zones.
- **L'imagerie par diffusion (DWI)** permet d'analyser la densité cellulaire des lésions en évaluant la diffusion de l'eau à travers le tissu.

- **L'imagerie dynamique avec injection de contraste (DCEI)** se concentre sur l'évaluation de la vascularisation à travers l'étude de l'intensité du signal émis par le produit de contraste par rapport au temps.

L'intégration de ces séquences offre une évaluation globale plus fine du risque de cancer cliniquement pertinent, facilitant ainsi un ciblage plus efficace des biopsies et minimisant les interventions inutiles. [78].

En somme, l'IRM multiparamétrique constitue un instrument fondamental pour le diagnostic des pathologies prostatiques, chaque séquence jouant un rôle distinct et fondamental dans l'identification et la caractérisation des lésions.

### **3. Système PI-RADS v2.1 et son rôle dans l'imagerie de la prostate :**

Le système PI-RADS (Prostate Imaging Reporting and Data System) constitue une approche normalisée destinée à l'évaluation des lésions de la prostate par le biais de l'IRM multiparamétrique (IRMmp). Ce système a été développé par l'American College of Radiology (ACR) en partenariat avec l'European Society of Urogenital Radiology (ESUR) et la fondation AdMeTech, dans le but de standardiser l'interprétation des IRM de la prostate et d'améliorer la détection des cancers cliniquement significatifs.

La première version, PI-RADS v1, a été publiée en 2012. La version actuelle, PI-RADS v2.1, publiée en 2019, intègre des ajustements visant à renforcer la reproductibilité et la précision des interprétations.

PI-RADS v2.1 repose sur l'utilisation de plusieurs séquences IRM :

- L'imagerie pondérée en T2 (T2W)
  - L'imagerie par diffusion (DWI)
  - Et l'imagerie dynamique après injection de produit de contraste (DCE)
- Combinées pour évaluer chaque lésion.

L'évaluation selon PI-RADS™ v2.1 repose sur une échelle à **5 points**, fondée sur la probabilité que les résultats combinés de l'IRMmp correspondent à la présence d'un cancer cliniquement significatif pour chaque lésion dans la glande prostatique.

**Tableau 3 : PI-RADS™ v2.1**

PIRADS 1	Probabilité très faible qu'un cancer cliniquement significatif soit présent
PIRADS 2	Probabilité faible qu'un cancer cliniquement significatif soit présent
PIRADS 3	Probabilité intermédiaire qu'un cancer cliniquement significatif soit présent
PIRADS 4	Probabilité élevée qu'un cancer cliniquement significatif soit présent
PIRADS 5	Probabilité très élevée qu'un cancer cliniquement significatif soit présent

Les biopsies sont généralement recommandées pour les lésions avec un score PI-RADS de 3 ou plus [80].

Avec la version PI-RADS 2.1, les critères d'évaluation des images ont été affinés pour améliorer la reproductibilité et la précision. Cette version recommande des paramètres spécifiques pour l'IRM à 1,5 ou 3 Tesla, et introduit

la possibilité de réaliser l'examen **sans bobine endorectale**, grâce aux améliorations de la qualité de l'image.

**Avantages de PI-RADS v2.1 :**

- **Standardisation** : En offrant des directives plus explicites et en harmonisant la terminologie, PI-RADS v2.1 permet aux radiologues à l'échelle mondiale d'appliquer des critères uniformes pour l'évaluation et le rapport des lésions prostatiques.
- **Meilleure stratification du risque** : Grâce à un système de score plus précis, **PI-RADS v2.1** permet de mieux identifier les patients qui nécessitent une biopsie ou une surveillance active.
- **Optimisation des décisions cliniques** : En précisant la classification des lésions et en diminuant la variabilité des interprétations, cette mise à jour favorise une communication améliorée entre radiologues et cliniciens, ce qui renforce l'efficacité de la prise de décision multidisciplinaire.

Bien que la version 2.1 du système PI-RADS ait notablement optimisé la détection des cancers de la prostate, des défis persistent, notamment une variabilité entre les observateurs dans l'évaluation des lésions. L'efficacité du PI-RADS est influencée par l'expertise du radiologue ainsi que par l'adhésion aux protocoles établis. Par ailleurs, il est établi que certaines lésions classées comme de grade intermédiaire (PI-RADS 3) peuvent être sujettes à un surdiagnostic, entraînant ainsi des biopsies inutiles [90,91].

## **4. IRM et Cancer de la Prostate :**

### **4.1 Prévention et Diagnostic Précoce :**

L'IRM a transformé le parcours de diagnostic du cancer de la prostate. Chez les patients ayant un PSA élevé ou un examen rectal suspect, avant toute biopsie, il est conseillé de réaliser une IRM afin de détecter les lésions suspectes, conformément aux recommandations internationales, en particulier de l'association européenne d'urologie. Cette approche permet d'améliorer la détection des cancers cliniquement significatifs tout en réduisant les biopsies inutiles et les diagnostics de cancers indolents [78].

Une étude menée par Olivier Rouvière et son équipe, réalisée entre juillet 2015 et août 2016 dans 16 centres en France, avait pour objectif d'évaluer si l'IRM multiparamétrique (IRMmp) avant une biopsie pouvait améliorer la détection des cancers de la prostate cliniquement significatifs chez les patients n'ayant jamais subi de biopsie.

Les résultats ont révélé que la biopsie systématique et la biopsie ciblée présentaient une efficacité similaire pour détecter les cancers de la prostate de grade ISUP 2 ou plus. Cependant, il a été observé que la biopsie ciblée seule pouvait manquer jusqu'à 6 % des cancers significatifs lorsqu'elle n'est pas associée à la biopsie systématique.

La combinaison des deux techniques a permis d'améliorer significativement la détection. Ainsi, malgré l'apport de l'IRMmp, la biopsie systématique demeure essentielle, car elle permet d'identifier des cancers susceptibles d'être manqués par la biopsie ciblée seule [85].

## **4.2 Avantages de l'IRMmp par rapport aux Méthodes Traditionnelles :**

L'IRMmp offre une sensibilité accrue pour la détection des cancers prostatiques par rapport aux approches traditionnelles basées sur le PSA seul. Grâce à la cartographie précise des lésions, les biopsies ciblées par IRM permettent d'éviter des traitements inutiles pour les cancers indolents, tout en garantissant une prise en charge rapide des cancers agressifs [80].

## **4.3 L'IRM dans la Gestion et le Suivi des Cancers de la Prostate :**

### **4.3.1 Utilisation dans la Surveillance active :**

L'IRM joue un rôle essentiel dans la surveillance active des patients présentant un cancer de la prostate de faible risque. Chez les patients ayant un score de Gleason faible (3+3=6), l'absence de lésions visibles à l'IRM est associée à un pronostic favorable, ce qui permet de réduire la fréquence des biopsies répétées et des traitements radicaux [78].

### **4.3.2 Suivi post traitement :**

L'IRM est également utile pour détecter les récurrences, les séquences d'imagerie fonctionnelle sont efficaces pour les détecter après une prostatectomie radicale ou une radiothérapie externe, mais elles diffèrent selon le traitement.

L'IRM dynamique avec contraste (DCEI) se révèle être un outil fiable et efficace pour détecter les récurrences du cancer de la prostate. L'association de la DCEI et de l'imagerie par diffusion (DWI) est très efficace après la radiothérapie. Quant à l'imagerie pondérée en T2, bien que limitée en termes de précision, reste cruciale pour l'analyse morphologique de la région concernée.[5]

### **4.3.3 Impact de l'IRM sur les Décisions Chirurgicales :**

L'IRM multiparamétrique (IRMmp) est fréquemment utilisée pour le **staging** du cancer de la prostate avant une chirurgie. Elle fournit des images détaillées des plans axial, coronal et sagittal de l'anatomie pelvienne, permettant **la mesure précise de la taille de la prostate et de l'espace pelvien**. Ces informations aident à guider les chirurgiens dans la préservation du **faisceau neurovasculaire (NVB)** [84].

Les marges chirurgicales positives (PSM) sont définies par la présence de cellules tumorales atteignant la marge d'encre du spécimen chirurgical, ce qui signifie que tout le cancer n'a peut-être pas été complètement enlevé. L'IRM préopératoire joue un rôle crucial dans la détection des facteurs de risque de PSM en évaluant la relation entre la tumeur et la capsule prostatique. Lorsque la tumeur touche ou dépasse la capsule, le risque de PSM augmente considérablement. L'objectif principal de l'IRM est donc d'identifier ces risques et d'évaluer les facteurs de complications peropératoires, avec une attention particulière portée à l'extension extra-prostatique (EPE), qui est un déterminant clé de la stratégie chirurgicale. En analysant la localisation précise des tumeurs, notamment au niveau de l'apex prostatique, du col vésical et de la région périprostatique, cela permet d'ajuster l'approche chirurgicale.

La prévalence des MSP est plus élevée dans les régions postéro-latérales, où se trouvent les faisceaux neurovasculaires (NVB), en raison des efforts de conservation de cette structure cruciale pour préserver la continence urinaire et la fonction sexuelle en post-chirurgical [84].

## **5. Limitations de l'IRM :**

Une étude rétrospective menée sur des patients ayant bénéficié d'une biopsie par fusion IRM/TRUS, réalisée par un urologue expérimenté avec trois ans de pratique dans cette technique réalisée dans la période entre janvier 2015 et mars 2016. Les clichés IRM ont initialement été interprétés de manière prospective par l'un de 33 radiologues abdominaux (groupe AR), chacun ayant une expérience médiane de 8 ans. Après une période de repos prolongée de 14 mois, des radiologues spécialisés en imagerie prostatique (groupe PR) ont réévalué de façon indépendante toutes les régions d'intérêt biopsiées, en utilisant l'échelle de Likert.

**Tableau 4 : L'échelle de Likert**

Likert Score	Description
1	Il est très improbable qu'un cancer cliniquement significatif soit présent.
2	Il est peu probable qu'un cancer cliniquement significatif soit présent.
3	La présence d'un cancer cliniquement significatif est incertaine.
4	Il est probable qu'un cancer cliniquement significatif soit présent.
5	Il est très probable qu'un cancer cliniquement significatif soit présent.

L'analyse a révélé que le groupe AR avait attribué plus de lésions Likert 4 que le groupe PR, avec plus du double de diagnostics.

En revanche, un plus grand nombre de lésions Likert 2, 3 et 5 ont été attribuées par le groupe PR. La probabilité de détecter un cancer de la prostate

cliniquement significatif (csPCa) augmentait en fonction des scores Likert dans les deux groupes, mais cette augmentation était **plus marquée pour le groupe PR**. En particulier, la probabilité de détecter un csPCa dans une lésion Likert 5 était significativement plus élevée pour **le groupe PR** que pour le groupe AR. Il n'y avait toutefois pas de différence significative dans la détection des csPCa pour les lésions Likert 4 entre les deux groupes.

Les lésions IRM-négatives identifiées par le groupe PR présentaient une valeur prédictive négative (VPN) **plus élevée** pour aboutir à une biopsie non significative cliniquement que celles évaluées par le groupe AR. Les lésions IRM-positives (Likert 4-5) notées par le groupe PR étaient plus souvent associées à un csPCa que celles évaluées par le groupe AR.

La sensibilité et la spécificité de l'IRM pour détecter un csPCa étaient également plus élevées dans le groupe PR que dans le groupe AR. L'exactitude diagnostique globale était supérieure pour le groupe PR par rapport au groupe AR.

Ainsi, la sensibilité, la spécificité, la valeur prédictive positive (PPV) et la valeur prédictive négative (NPV) de l'IRM prostatique étaient systématiquement plus élevées dans le groupe PR.

**Tableau 5: Comparaison entre les groupes PR et AR**

	Groupe PR	Groupe AR	P
PPV	64,9%	39,3%	<0,0001
NPV	91,8%	76,6%	<0,0001
Sensibilité	85,9%	70,7%	0,0027
Spécificité	77,3%	46,8%	<0,0001
Précision diagnostique	80,1%	54,6%	<0,0001

Si seuls les résultats des biopsies ciblées avaient été pris en compte, un cancer de la prostate cliniquement significatif aurait été manqué chez 9,8 % des patients sans l'intervention d'un radiologue spécialisé en prostate [81].

Cette étude souligne une limitation majeure de l'IRM : sa dépendance à l'expertise du radiologue pour garantir une interprétation fiable des images. Cette expertise est cruciale pour réduire le recours aux biopsies non significatives et améliorer la prise en charge des pathologies prostatiques. Sans une lecture précise, l'efficacité de l'IRM dans la détection et le traitement du cancer de la prostate peut être compromise.

## **6. L'Utilisation de l'Intelligence Artificielle dans l'Imagerie de la Prostate : Une Solution Potentielle :**

L'intelligence artificielle (IA) a émergé comme un outil prometteur dans le domaine de l'imagerie médicale, et plus particulièrement dans l'imagerie par résonance magnétique (IRM) de la prostate. Avec l'augmentation des données médicales et des capacités de calcul, l'IA permet d'automatiser certaines tâches, d'améliorer la précision des diagnostics et de standardiser l'interprétation des images.

L'usage de l'IA dans l'IRM de la prostate se concentre sur plusieurs domaines, notamment :

- La segmentation des tumeurs.
- La classification des lésions.
- L'évaluation de la probabilité de cancer cliniquement significatif (csPCa).

### **6.1. Modèles d'intelligence artificielle pour l'interprétation de l'IRM :**

Plusieurs modèles d'intelligence artificielle, principalement basés sur des réseaux de neurones convolutifs (CNN), ont été développés pour l'interprétation de l'IRM prostatique. Ces modèles visent à automatiser la détection et la segmentation des lésions, ainsi qu'à améliorer la précision des diagnostics par rapport à l'évaluation humaine seule.

#### **6.1.1 U-Net :**

U-Net est une architecture de réseau de neurones convolutifs (CNN) spécialement **conçue pour la segmentation d'images médicales**. Elle a été initialement développée en 2015 par Olaf Ronneberger et son équipe pour segmenter des images microscopiques en biologie. Depuis, U-Net a été largement adopté pour des tâches de segmentation dans différents domaines de l'imagerie médicale, y compris l'IRM de la prostate.

L'architecture U-Net se compose de deux parties principales :

- **La phase d'encodage** : C'est un réseau convolutif traditionnel qui réduit la résolution de l'image d'entrée tout en capturant ses

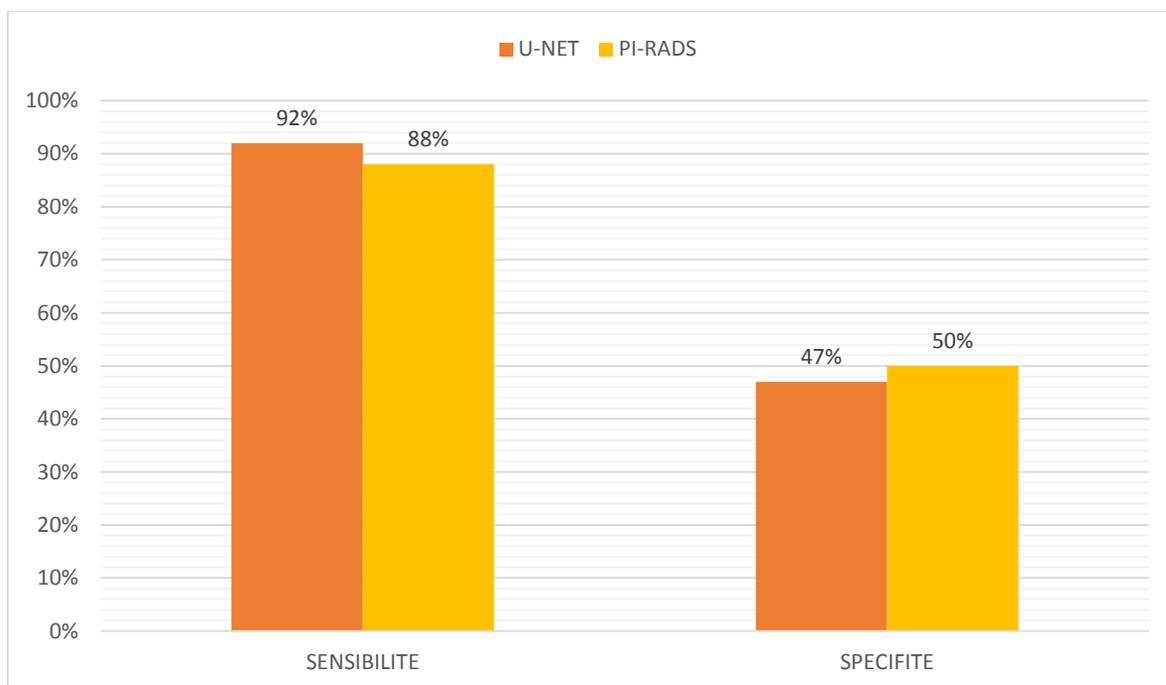
caractéristiques importantes. Il s'agit d'une série de couches de convolution et de pooling.

- **La phase de décodage** : Elle reconstruit une image segmentée à partir des caractéristiques extraites dans la phase d'encodage. Cette partie du réseau augmente la résolution tout en utilisant des opérations de convolution transposée (ou déconvolution).

Entre la phase d'encodage et de décodage, U-Net utilise des **connexions sautées** (skip connections), ce qui permet au réseau de conserver les détails d'information spatiale des couches d'encodage, facilitant ainsi une segmentation précise.

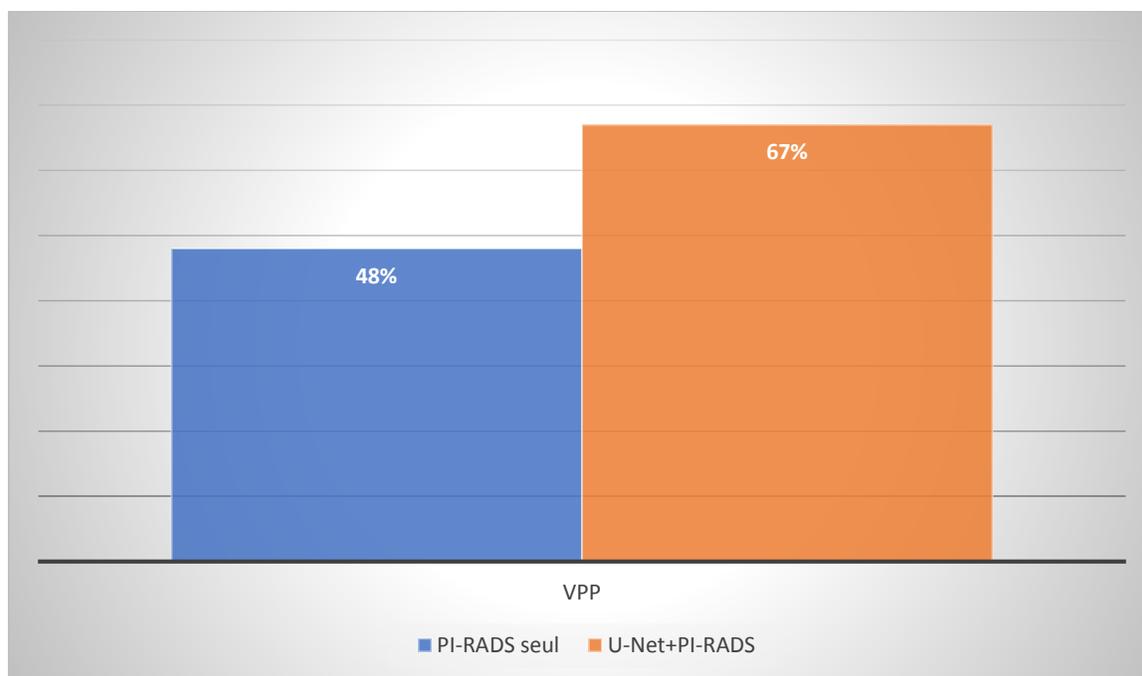
Dans une étude menée par **Schelb et al.**, U-Net a été formé à partir de séquences pondérées en T2 et en diffusion (DWI) pour détecter les lésions prostatiques suspectes. Le modèle a ensuite été comparé à l'évaluation clinique basée sur le système PI-RADS.

Les résultats ont montré que U-Net avait une sensibilité de 92 % et une spécificité de 47 %, des performances similaires à celles du PI-RADS, qui affichait une sensibilité de 88 % et une spécificité de 50 % pour les lésions suspectes de grade 2 ou plus [87].



**Graphique 3: Comparaison de la sensibilité et la spécificité entre U-NET et PI-RADS**

La principale différence résidait dans l'amélioration de la **valeur prédictive positive (VPP)** lorsque les détections automatiques de U-Net étaient combinées avec les évaluations humaines PI-RADS, améliorant la VPP de **48% à 67%**. Cela montre le potentiel de l'IA pour améliorer la précision des diagnostics tout en réduisant les erreurs humaines.[87]



**Graphique 4: Comparaison des VPP entre PI-RADS seul et combinée avec U-Net.**

### **6.1.2 Radiomics :**

Les radiomics représentent une approche avancée en imagerie médicale permettant d'extraire un large éventail de caractéristiques quantitatives à partir d'images médicales. En analysant des caractéristiques telles que la texture, la forme et l'intensité, l'IA peut détecter des schémas qui échappent à l'œil humain. Stanzione et al. ont mené une revue systématique sur les études radiomics dans l'IRM prostatique et ont évalué la qualité de ces études à l'aide du score de qualité radiomique (RQS). Les résultats ont révélé que, bien que ces approches soient prometteuses, la plupart des études souffraient d'un manque de validation externe et de reproductibilité, ce qui limite leur adoption clinique à grande échelle [88].

### **6.1.2.1 Principe des Radiomics :**

Les radiomics consistent à convertir des images médicales, comme les IRM de la prostate, en données numériques extractibles. Ce processus comprend plusieurs étapes :

- **Acquisition et reconstruction d'image** : Une image médicale est acquise à l'aide d'une modalité comme l'IRM, puis reconstruite.
- **Segmentation de l'image** : Les structures d'intérêt, telles que la glande prostatique et les lésions suspectes, sont segmentées, soit manuellement, soit automatiquement grâce à des algorithmes.
- **Extraction des caractéristiques** : Les radiomics extraient des milliers de caractéristiques des images, incluant des informations sur la forme, la texture, l'intensité...

Ces caractéristiques peuvent ensuite être analysées et corrélées avec des données cliniques et biologiques pour établir des biomarqueurs permettant de **prédire** la réponse au traitement ou le risque de progression du cancer [89].

### **6.1.2.2. Applications des Radiomics dans l'IRM Prostatique :**

Dans le cadre de l'imagerie prostatique, les radiomics permettent d'obtenir des informations plus précises sur les tumeurs que les analyses traditionnelles ne peuvent fournir. En analysant la texture et les variations d'intensité au sein des lésions détectées, les radiomics peuvent aider à différencier les tissus cancéreux des tissus normaux, ainsi qu'à évaluer l'agressivité des tumeurs.

Un exemple clé est l'utilisation des radiomics pour analyser les séquences d'IRM pondérées en T2 et en diffusion (DWI), ce qui permet de déterminer le

risque de cancer cliniquement significatif (csPCa). Dans plusieurs études, cette approche a montré son efficacité pour affiner la prédiction du grade tumoral et ajuster les stratégies de traitement en fonction de chaque patient [89].

#### 6.1.2.3 Limites Actuelles des Radiomics :

**Stanzione et al.** ont mené une revue systématique sur les études radiomics dans l'IRM prostatique et ont évalué la qualité de ces études à l'aide du score de qualité radiomique (RQS). Les résultats ont révélé que, bien que ces approches soient prometteuses, la plupart des études souffraient d'un manque de validation externe et de reproductibilité, ce qui limite leur adoption clinique à grande échelle [88].

#### 6.2. Limites de l'IA dans l'IRM Prostatique :

Malgré les avancées significatives, l'IA dans l'IRM prostatique présente encore plusieurs défis :

- **Dépendance aux données d'entraînement :** Les performances des modèles d'IA dépendent largement de la qualité et de la quantité des données d'entraînement. Un modèle formé sur un ensemble de données limité ou biaisé peut ne pas être généralisable à d'autres contextes cliniques [90].
- **Reproductibilité et validation :** Un manque de standardisation dans les protocoles d'IRM et les méthodes d'extraction de caractéristiques limite la reproductibilité des résultats. De plus, peu d'études utilisent des ensembles de données externes pour valider leurs modèles, ce qui est essentiel pour une adoption clinique à grande échelle [91].

### **6.3. Potentiel Futur de l'IA dans l'IRM Prostatique :**

L'avenir de l'intelligence artificielle dans l'imagerie par résonance magnétique de la prostate semble très encourageant. Grâce aux avancées constantes des algorithmes d'apprentissage et à l'accès à des ensembles de données annotées de plus en plus vastes, l'IA a le potentiel de révolutionner l'interprétation des images par les radiologues. De plus, les outils d'IA pourraient s'avérer essentiels dans le processus décisionnel clinique, en facilitant l'identification des patients présentant un risque élevé de cancer de la prostate significatif sur le plan clinique, tout en contribuant à diminuer le nombre de biopsies inutiles.[14].

Les étapes futures pour une intégration complète de l'IA dans la pratique clinique incluent la nécessité de **multicentriques** et de **multivendeurs**, garantissant ainsi que les algorithmes peuvent être utilisés dans divers environnements cliniques. [87]

#### **6.3.1. Amélioration Continue des Algorithmes :**

Pour que l'intelligence artificielle (AI) puisse être intégrée comme un outil de diagnostic standard dans les établissements hospitaliers, des avancées supplémentaires sont requises. En diversifiant les ensembles de données utilisés pour l'entraînement et en mettant en place des protocoles multicentriques, il serait possible d'optimiser les performances des algorithmes de Deep-learning tels que U-Net. Cela contribuerait à diminuer le taux de faux positifs et à rehausser la précision dans la segmentation des lésions. [87]

## **7. Conclusion :**

L'IRM est devenue un outil incontournable dans la gestion du cancer de la prostate, en particulier grâce à l'IRM multiparamétrique et au système PI-RADS. Ces avancées ont permis de réduire le surdiagnostic, d'améliorer la précision du diagnostic, et de mieux gérer la surveillance active des patients à faible risque. À l'avenir, l'intégration de la radiomique et de l'intelligence artificielle pourrait encore optimiser ces pratiques.

**L'ANATOMIE**  
**CHIRURGICALE DE LA**  
**PROSTATE**

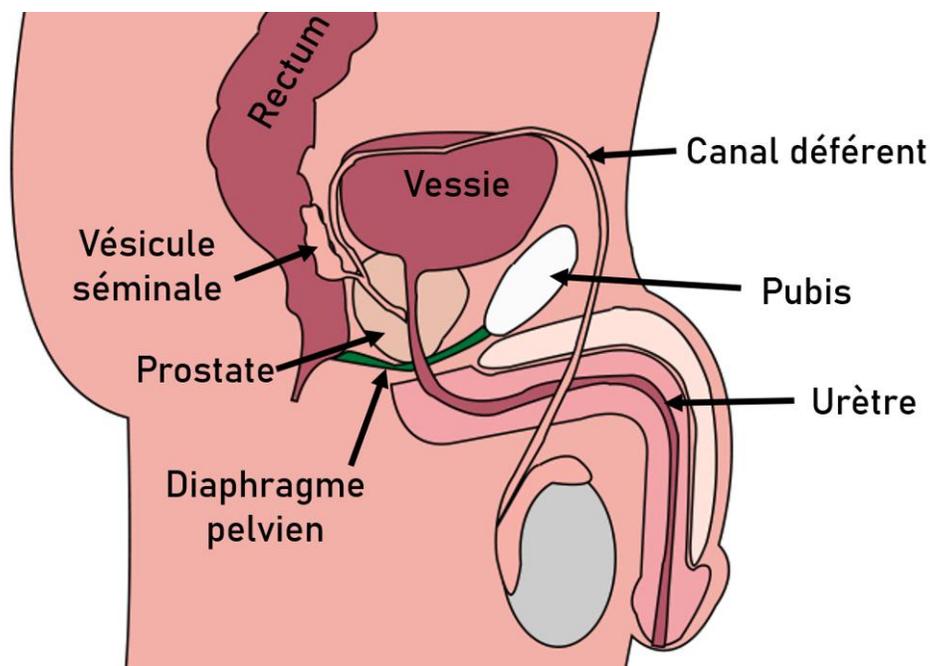
## **I. Anatomie macroscopique de la prostate :**

### **1. Morphologie et dimensions :**

La prostate est une glande de structure fibro-musculaire robuste mesurant en moyenne 4 cm de large, 3 cm de hauteur et 2 cm d'épaisseur. Elle adopte une forme irrégulièrement conique, dont la base est située au-dessus, entourant le col de la vessie, et l'apex se trouve en dessous, sur le sphincter urétral externe. L'urètre prostatique y pénètre au centre, près de la surface antérieure, qui est étroite et convexe [92].

La prostate, outre sa base et son apex, présente une face antérieure, une face postérieure et des faces inféro-latérales.

- ✓ La face antérieure de la prostate est positionnée à l'arrière de l'espace rétro-pubien et est connectée à l'os pubien par les ligaments pubo-prostatiques.
- ✓ La face postérieure de la prostate où l'on peut sentir un sillon médian vertical lors de l'examen rectal, elle est séparée du rectum par le fascia recto-vésical, également connu sous le nom de fascia de Denonvilliers.
- ✓ Les faces inféro-latérales, soutenues par la partie antérieure du diaphragme pelvien.



**Figure 29:Vue latérale de la prostate et des structures adjacentes**

Les canaux éjaculateurs pénètrent la face postérieure de la prostate, environ 1 cm sous le col vésical, et la traversent sur environ 2 cm avant de s'ouvrir dans l'urètre prostatique. Les canaux prostatiques se jettent également dans cette portion de l'urètre [93].

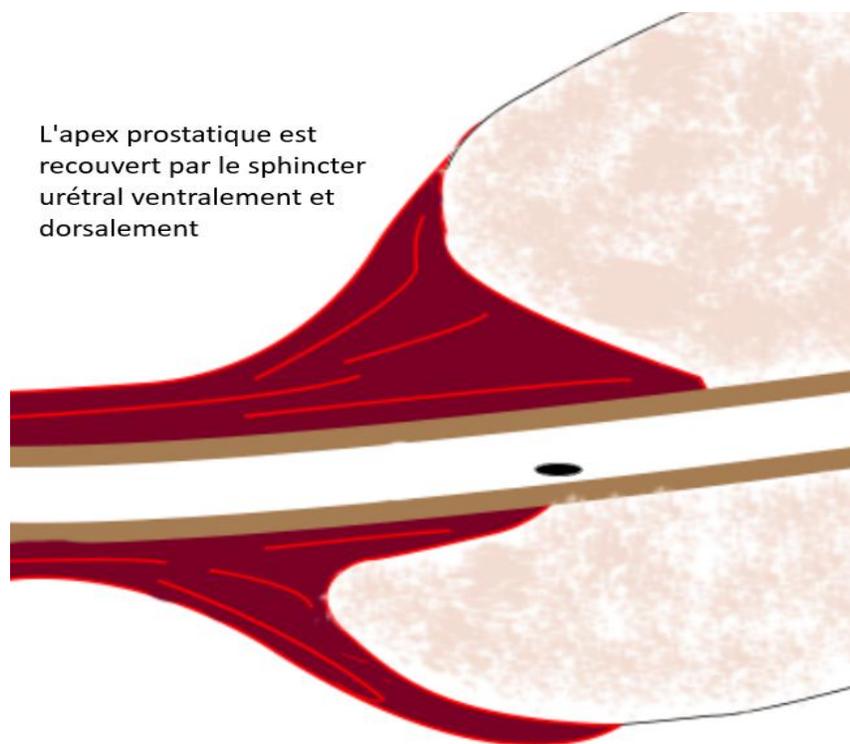
## **2. Variations Anatomiques de l'Apex Prostatique :**

***"All men are created equal but not all prostates are"***

***"Tous les hommes sont créés égaux, mais toutes les prostates ne le sont pas."***

La prostate présente une diversité morphologique interindividuelle considérable, cette variation étant principalement observée au niveau de l'apex prostatique [94].

Au cours de la puberté, la prostate entame un processus de croissance et s'intègre au sphincter urétral, dont certaines fibres sont partiellement recouvertes et incorporées dans la prostate au niveau de son apex (Figure 30) [95,96].



**Figure 30: Recouvrement de l'apex par le sphincter**

Les investigations anatomiques et fonctionnelles ont mis en évidence que la longueur de l'urètre fonctionnel se situe entre 1,5 et 2,4 cm, une proportion importante étant localisée au sein de la prostate, particulièrement entre l'apex et le verumontanum. Cela explique la nécessité de limiter la résection transurétrale de la prostate (RTUP) au-dessus de ce repère afin d'éviter de fragiliser le sphincter strié.

L'entrecroisement des fibres du sphincter urétral externe avec le tissu prostatique crée une intrication anatomique complexe ayant deux conséquences majeures dans la chirurgie prostatique :

1. L'imprécision des limites anatomiques de l'apex prostatique pendant la prostatectomie, ce qui complique la définition d'un plan de section optimal. L'objectif est de réaliser une exérèse tumorale complète sans marges positives, tout en préservant au maximum le sphincter urétral afin de minimiser le risque d'incontinence, complication fréquente et directement liée à l'atteinte sphinctérienne lors des prostatectomies radicales.

2. Complexité dans le contrôle du plexus veineux de Santorini, en raison de la difficulté à gérer la profondeur lors des interventions chirurgicales [97].

Selon Lee et al. l'apex prostatique peut recouvrir l'urètre membraneux selon plusieurs configurations anatomiques :

- Chevauchement circonférentiel : L'apex recouvre complètement l'urètre membraneux.
- Chevauchement symétrique bilatéral : L'apex recouvre l'urètre membraneux de manière symétrique des deux côtés.
- Chevauchement asymétrique unilatéral : L'apex recouvre davantage l'urètre membraneux d'un côté que de l'autre.
- Chevauchement antérieur ou postérieur : L'apex recouvre soit la partie antérieure, soit la partie postérieure de l'urètre membraneux.
- Absence de chevauchement [99].

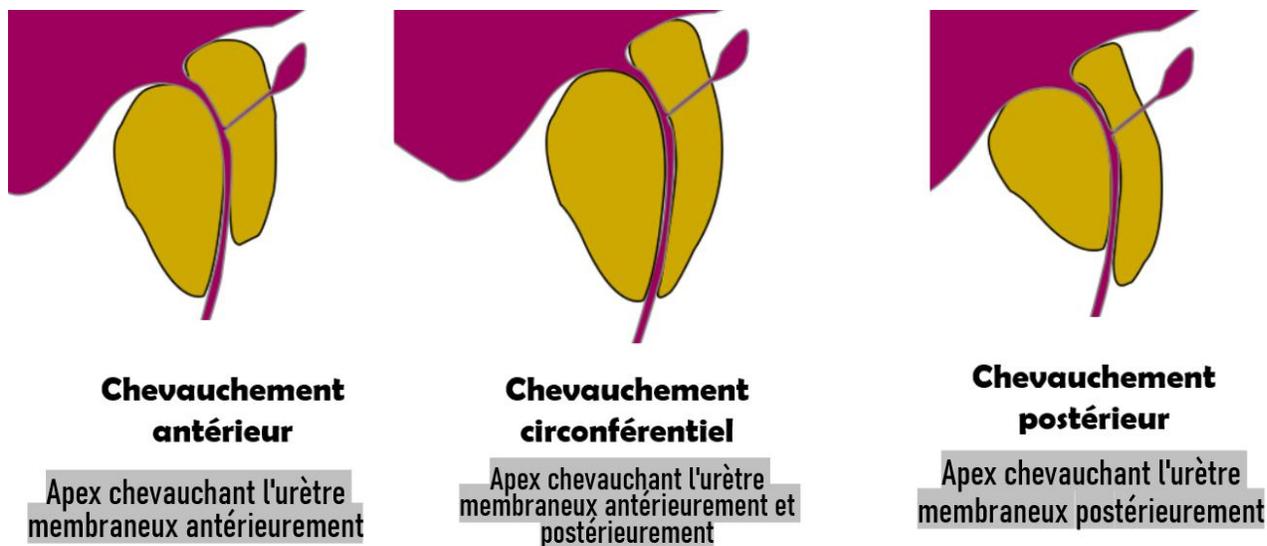
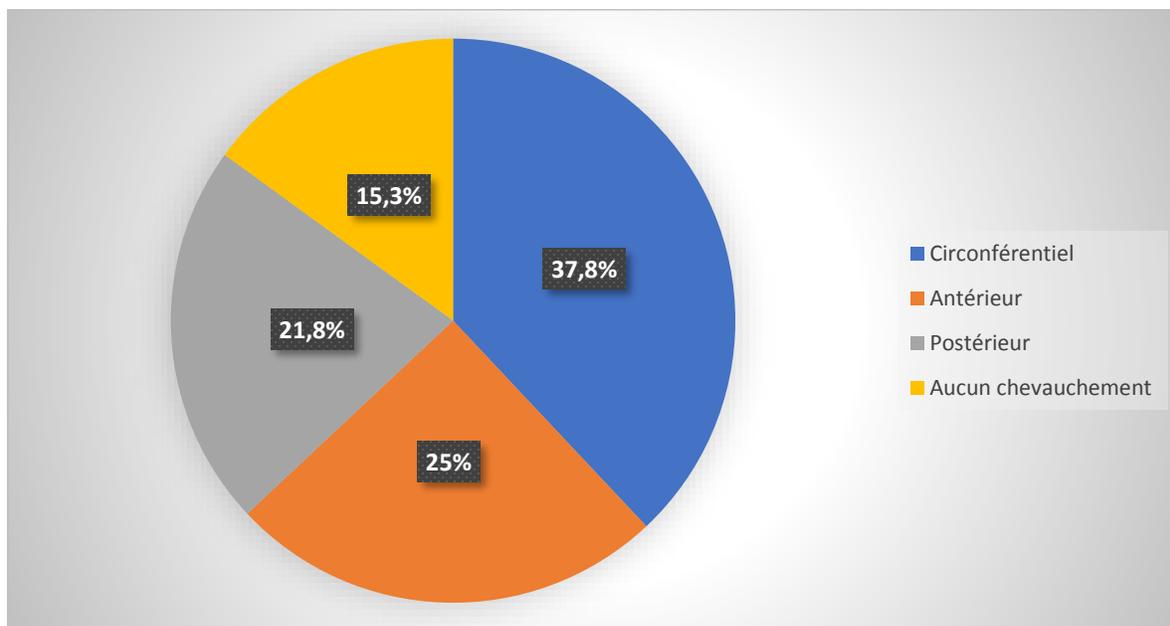


Figure 31: Les différents types de chevauchements



Graphique 5: Types de Chevauchements selon Lee et al.

Cette variabilité anatomique souligne l'importance d'une évaluation radiologique préalable de la morphologie prostatique, permettant ainsi de planifier une intervention optimisée pour préserver la continence. Le principal

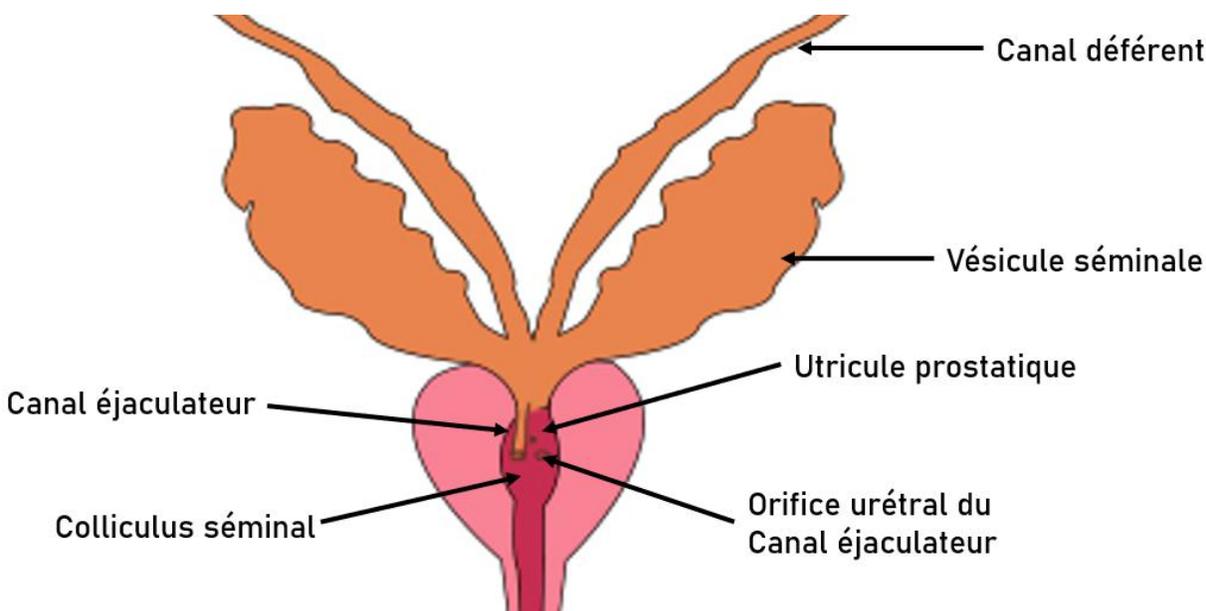
défi réside dans l'identification précise de la limite supérieure du sphincter urétral, afin de concilier préservation fonctionnelle et sécurité oncologique [99].

## **II.Relations avec les structures adjacentes :**

### **1. Les vésicules séminales :**

La prostate entretient des relations anatomiques étroites avec plusieurs structures pelviennes essentielles, ce qui complexifie les interventions chirurgicales dans cette région.

Les vésicules séminales (VS) sont des structures paires en forme de sacs lobulés dotées de parois minces, qui se présentent sur la face postérieure de la base de la vessie. À leur extrémité inférieure, le canal de la vésicule séminale se connecte au conduit déférent, formant ainsi le conduit éjaculateur, qui débouche dans l'urètre prostatique au niveau du verumontanum [93].



**Figure 32:Vésicules séminales et leurs orifices urétraux**

La section des vésicules séminales fait partie intégrante de la prostatectomie radicale, en raison du risque accru, en cas de leur préservation, d'augmenter les marges chirurgicales positives ainsi que le risque de rétention purulente [100].

## **2. La vessie :**

L'observation latérale des organes pelviens met en évidence une bascule antérieure de la vessie par rapport à la prostate. Le trigone vésical est fortement basculé en avant, formant un angle d'environ 45 degrés avec le plan horizontal. La vessie se rétrécit au niveau de son apex qui est fixé à la paroi abdominale antérieure et s'aligne avec le plan horizontal. Même lorsque la vessie est relativement vide, elle apparaît légèrement proéminente par rapport au pelvis [101].

La délimitation anatomique exacte entre le col vésical et la prostate constitue un défi significatif en chirurgie. Le lissosphincter, qui se trouve principalement au niveau du col vésical, est crucial pour la continence urinaire, car il assure une fermeture étanche de l'orifice interne de l'urètre, isolant ainsi le réservoir (la vessie) de l'urètre prostatique et de l'appareil génito-urinaire [147].

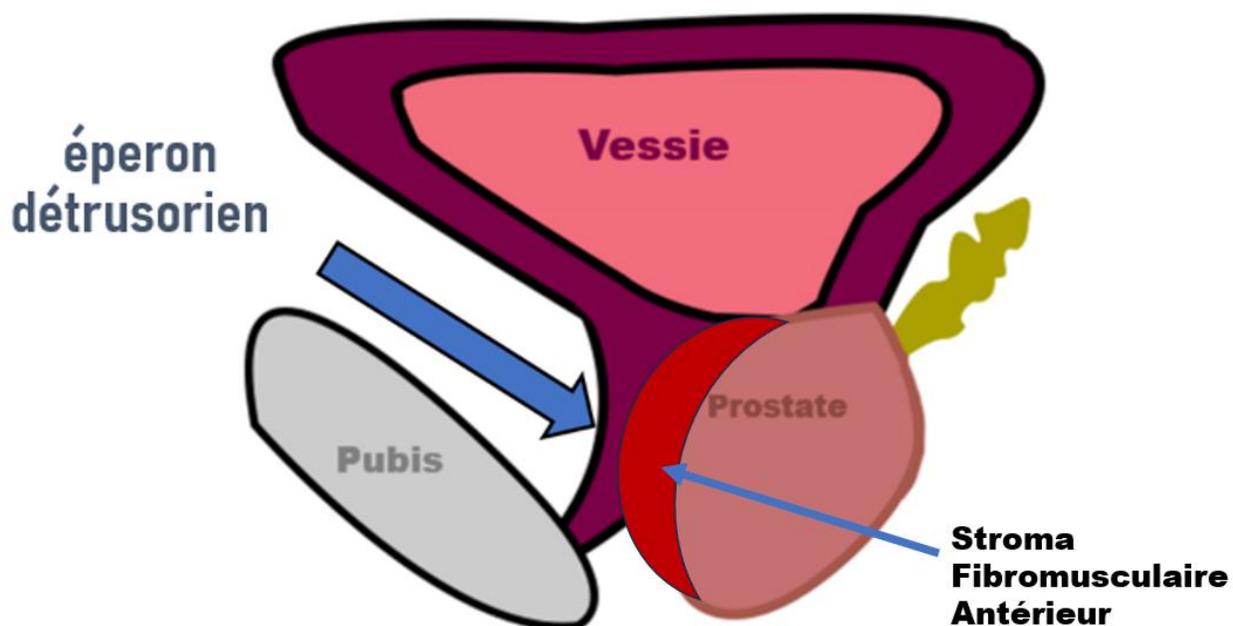
Une dissection minutieuse de cette région est indispensable pour préserver le lissosphincter et ainsi assurer la continence urinaire postopératoire. Cette nécessité a conduit à l'essor de la technique de préservation du col vésical. En préservant le lissosphincter, cette approche chirurgicale favorise une récupération plus rapide de la continence urinaire et réduit significativement le risque d'incontinence postopératoire. De plus, la conservation de la zone de

transition urothéliale contribue à maintenir une barrière étanche naturelle à l'urine, renforçant ainsi la continence. Cette technique, tout en assurant une prise en charge oncologique optimale, offre des résultats fonctionnels améliorés pour les patients [183].

### 3. L'éperon détrusorien :

Dans son analyse détaillée de l'éperon détrusorien, Myers a mis en lumière que la représentation traditionnelle de la vessie, limitée antérieurement au niveau du col vésical et entièrement posée au-dessus de la prostate « *comme un ballon à air chaud avec une nacelle en dessous* » est inexacte. En réalité, similairement à l'anatomie féminine, la paroi antérieure de la vessie est directement reliée au pubis par une extension de muscles lisses longitudinaux cette extension est décrite sous le nom de « **éperon détrusorien** ». Myers affirme également que

l'éperon détrusorien doit être considéré comme une composante clé du stroma fibromusculaire antérieur [102].



**Figure 33:Schématisation de l'éperon détrusorien**

En 1988, McNeal a affiné sa définition du stroma fibromusculaire antérieur (AFMS), le décrivant comme étant : "composé principalement de muscles lisses en continuité proximale avec les **fibres du détrusor** de la paroi antérieure de la vessie. Ces fibres s'étendent distalement depuis le col vésical et s'évasent latéralement, recouvrant toute la surface antérieure et antérolatérale de la prostate glandulaire." [103].

L'éperon détrusorien se manifeste de manière plus marquée le long de la ligne médiane, où le muscle lisse fusionne avec la prostate sous-jacente. Sur les côtés, il s'intègre à l'arc tendineux du fascia pelvien. En avant, le VD se termine par des attaches ligamentaires au niveau du pubis. Ces ligaments sont

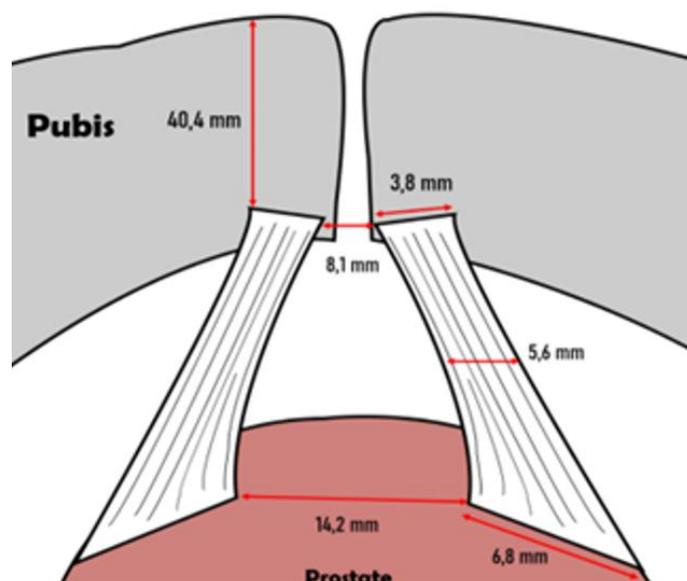
généralement désignés sous les termes de ligaments pubovésicaux ou puboprostatiques.

#### 4. Les ligaments puboprostatiques :

Les ligaments pubovésicaux ou puboprostatiques constituent des structures fibreuses appariées dérivées du fascia endopelvien viscéral. Ils se fixent sur le tiers distal de la face postérieure de l'os pubien, juste en avant et à proximité du sphincter urétral [102].

L'observation de la connexion étroite entre les ligaments puboprostatiques à la région antérieure de la vessie est évidente chez les patients présentant une prostate de taille normale ou réduite [105].

Une étude menée en 2019 par Hyun–Min Choi et al. a permis d'évaluer la configuration, la quantité et la disposition des ligaments puboprostatiques chez un total de 31 cadavres adultes [106].

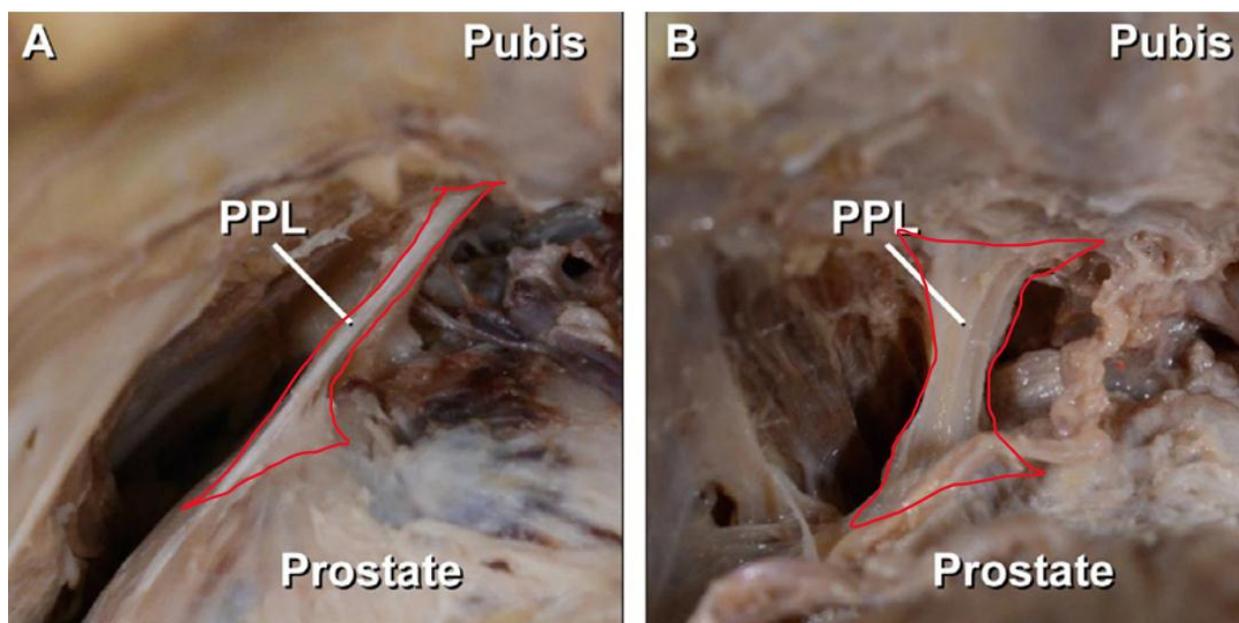


**Figure 34: Les mesures moyennes des ligaments puboprostatique**

L'étude a révélé que les ligaments puboprostatiques constituent la principale structure de soutien entre l'os pubien et la prostate. Les ligaments puboprostatiques se présentaient sous trois configurations principales :

- **Uniques bilatéralement** : observés chez 61,3 % des spécimens.
- **Doubles bilatéralement** : retrouvés chez 19,4 % des spécimens.
- **Formes mixtes** : observée chez 19,4 % des cas.

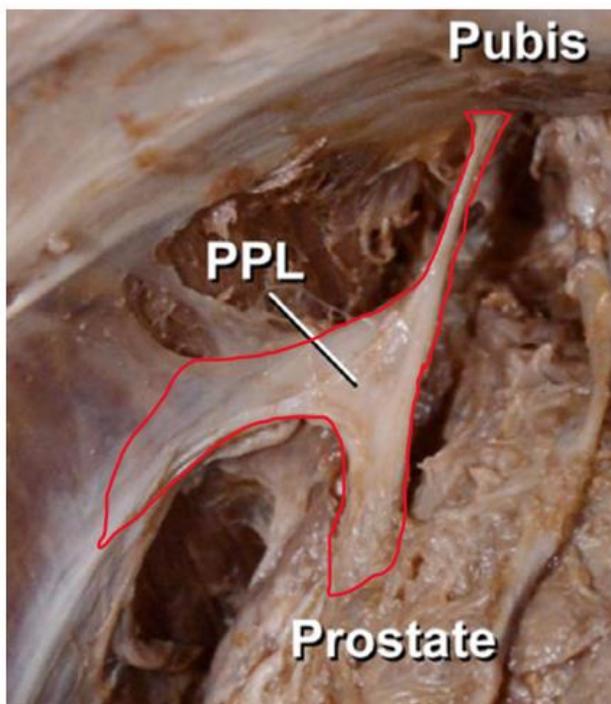
La majorité des ligaments étaient en forme de I (53,8%), plus fréquemment observés dans les spécimens avec des ligaments doubles [106].



**Figure 35:Ligaments puboprostatiques en forme de I**

Néanmoins, des variations morphologiques ont été notées, notamment lors de la présence d'attaches supplémentaires à la ligne arquée. Dans ces situations, 36,3% des spécimens présentaient des ligaments ayant une forme en  $\lambda$  (lambda), d'avantage présents dans les cas de ligaments simples, tandis que 8,8% adoptaient une forme en Y [106]

## Ligament en forme de $\lambda$



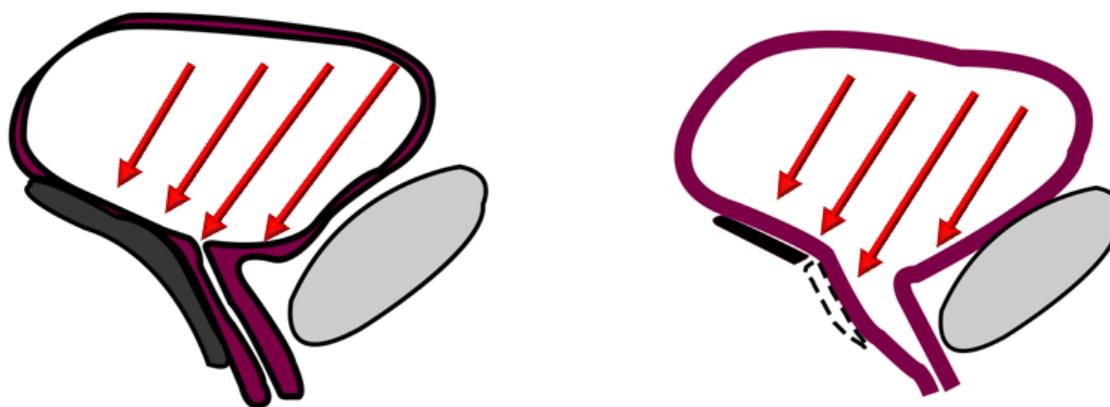
**Figure 36: Ligament puboprostatique en forme  $\lambda$  (lambda)**

Les ligaments puboprostatiques jouent un rôle important dans le mécanisme de continence en stabilisant la prostate, l'urètre et la vessie en les reliant à l'os pubien. Certains auteurs suggèrent de préserver ces ligaments lors de la prostatectomie radicale afin d'améliorer la récupération et de favoriser la préservation de la continence urinaire [107].

La structure des LPP a des implications sur sa fonction, élément qui doit être pris en considération lors des procédures chirurgicales de la prostate. Les LPP en forme de  $\lambda$  ou de Y, étant donné leur connexion au ligament arqué qui contribue également au mécanisme de suspension de l'urètre, peuvent offrir un avantage pour son soutien. Pour des raisons analogues, le caractère double des

LPP peut également jouer un rôle dans le maintien de la continence post-opératoire [106].

Selon les auteurs de cette recherche, la signification de la configuration et du nombre de ligaments puboprostatiques après une prostatectomie radicale (RP) peut être comprise à travers une analogie avec l'hypothèse du hamac relative à l'urètre féminin. Cette hypothèse suggère que la continence urinaire est assurée par un système composé d'une structure semblable à un hamac qui soutient la face postérieure de l'urètre, en plus de la pression abdominale, qui comprime la face controlatérale, provoquant ainsi un effondrement passif de l'urètre et ainsi une continence urinaire efficace [108].



**Figure 37:Schématisation de l'hypothèse du hamac**

Après l'extirpation prostatique, il y a une perte de la fonction sphinctérienne, raison pour laquelle le mécanisme de suspension prend de l'importance. Dans la recherche réalisée par Hyun-Min Choi et al., le LPP était solidement attaché de la région postérieure de la prostate jusqu'au col de la

vessie [106]. Cela, en plus de l'absence d'autres structures soutenant l'urètre membraneux, explique l'analogie avec l'hypothèse du hamac et souligne le rôle potentiel du LPP dans la récupération de la continence urinaire.

De plus, il a été mis en évidence que la partie latérale des LPP, surtout s'il est en configuration  $\lambda$  et Y, traverse le faisceau neurovasculaire. Il est impératif de faire preuve de prudence afin de ne pas compromettre ces faisceaux lors de la résection de la partie latérale.

Par ailleurs, le chirurgien doit faire preuve de prudence en ce qui concerne l'intervalle entre les deux LPP en raison du passage du complexe veineux dorsal à travers cette zone [106].

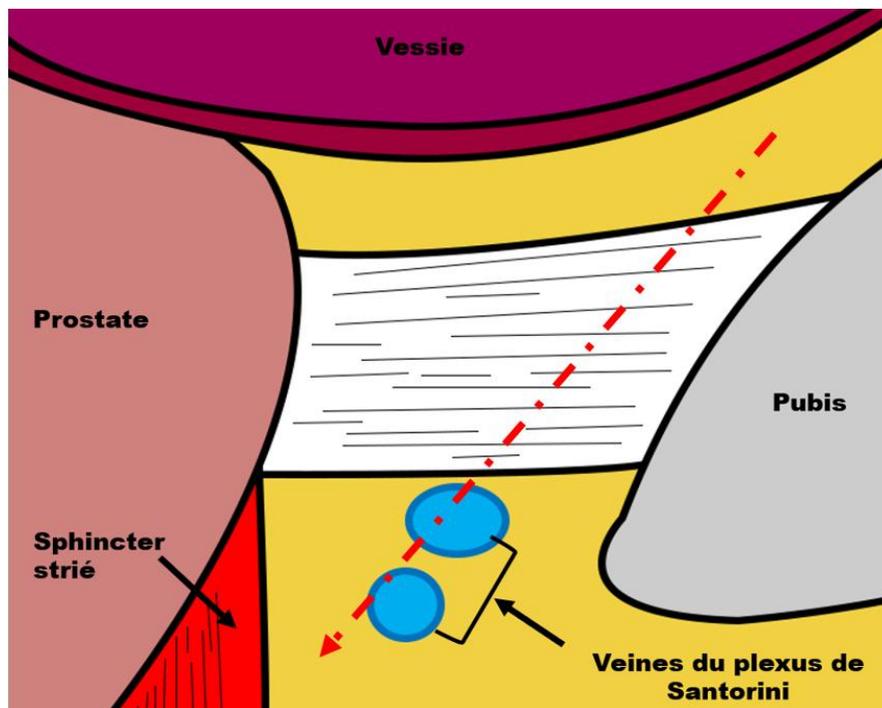


Figure 38: Coupe sagittale montrant la région rétropubienne et le plan de dissection dans la prostatectomie rétropubienne (Flèche rouge)

En 2010, Galfano et al. ont décrit une approche novatrice, la prostatectomie radicale robotisée épargnant Retzius (RS-PRAR), également connue sous le nom de technique de Bocciardi. Cette technique innovante permet de préserver les structures responsables du mécanisme de continence en contournant l'espace de Retzius et en accédant à la prostate par le péritoine pariétal au niveau de l'espace vésico-rectal. Cette technique permet d'éviter d'endommager les ligaments pubo-prostatiques ainsi que d'autres structures impliquées dans la continence urinaire et la puissance sexuelle, telles que le fascia endopelvien, les faisceaux neurovasculaires, les artères pudendales et le plexus de Santorini [181].

La préservation de ces ligaments a permis d'améliorer la continence urinaire et de diminuer les pertes sanguines, sans augmenter les marges chirurgicales positives [109].

Inspirée de cette technique, la technique HOOD a été créée, permettant de préserver le contenu de l'espace de Retzius tout en adoptant une approche antérieure. Les tissus préservés après l'ablation de la prostate prennent l'apparence d'une "cape" composée de l'apron du détrusor, de l'arc tendineux, du ligament puboprostatique, des vaisseaux antérieurs et de certaines fibres du muscle détrusor. Cette "cape" entoure et protège l'urètre membraneux, le sphincter externe et les structures de soutien, permettant ainsi un retour précoce de la continence sans compromettre les taux de marges chirurgicales [184].

### **III.L'anatomie chirurgicale du sphincter urétral, ses**

#### **composantes, sa structure et son rôle :**

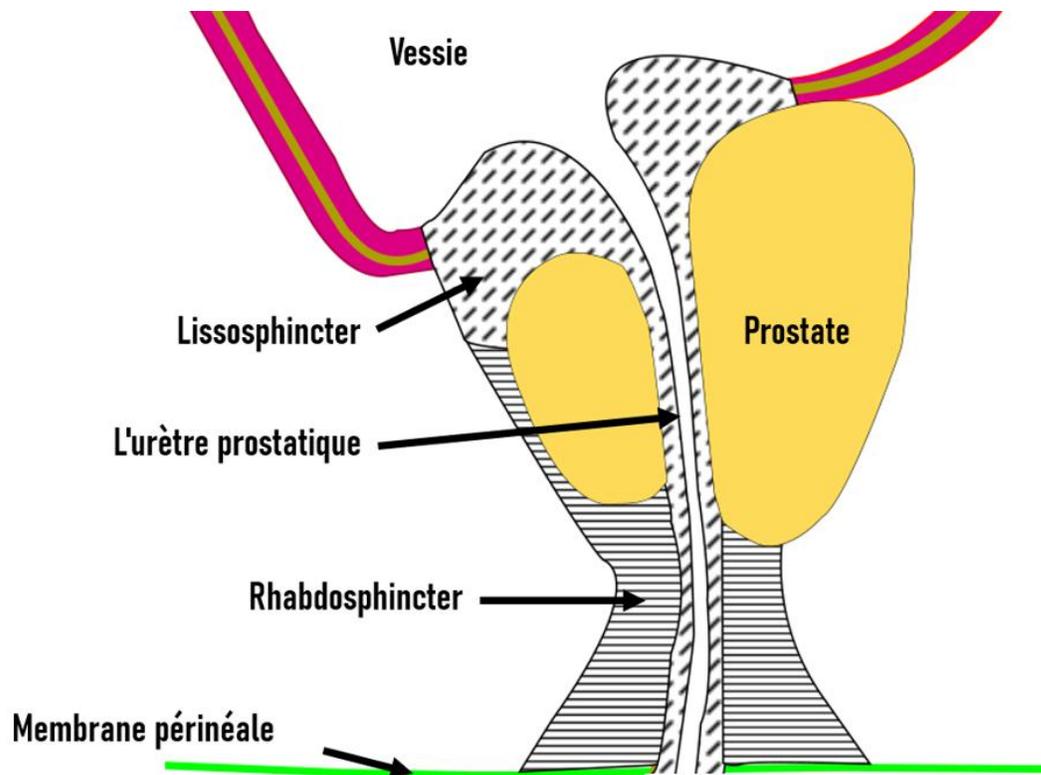
##### **1.Introduction :**

Le sphincter urétral est une structure complexe essentielle pour la continence urinaire. Son anatomie et son fonctionnement sont d'une importance cruciale, en particulier dans des contextes chirurgicaux comme la prostatectomie radicale. Ce chapitre explore sa structure, ses composantes musculaires, son rôle fonctionnel et son innervation.

##### **2.Anatomie et structure du sphincter urétral**

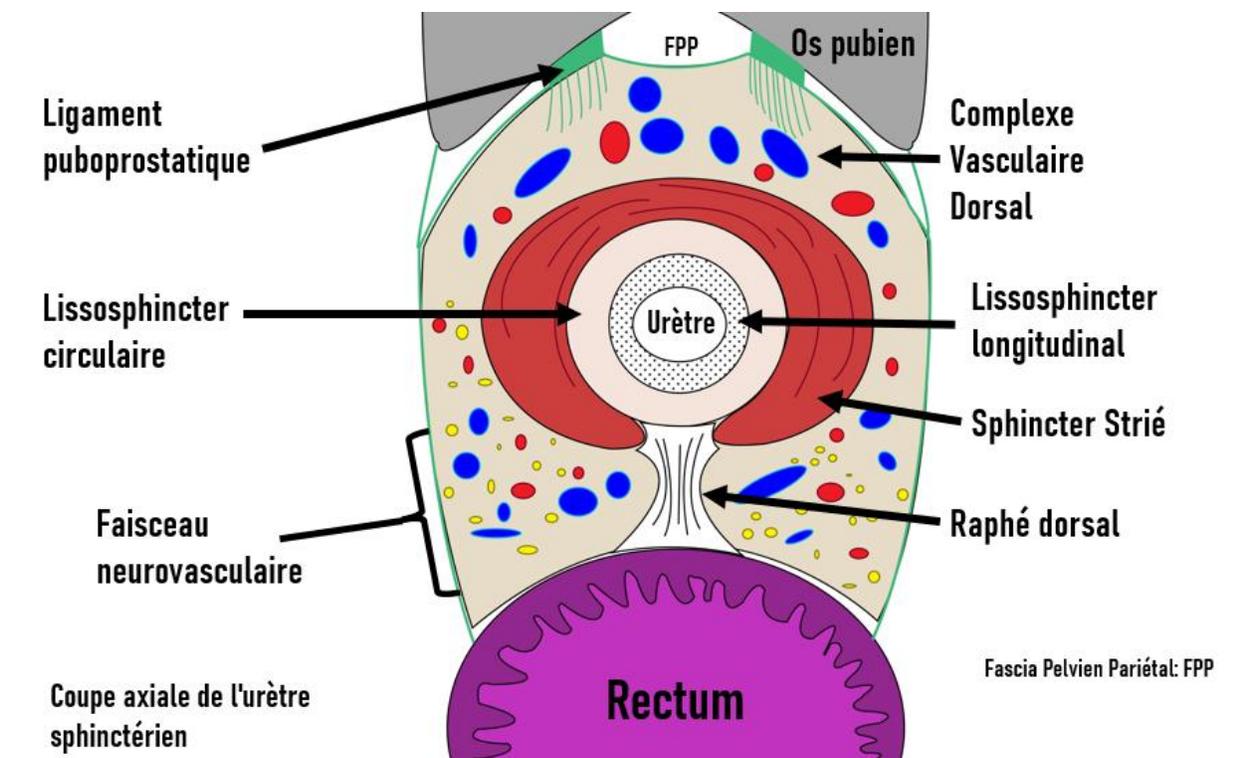
Le complexe sphinctérien urétral s'étend depuis l'orifice vésical jusqu'à l'extrémité distale de l'urètre membraneux. Il s'étend caudalement jusqu'au niveau du collicule séminal, formant un cylindre entourant l'urètre. Le sphincter urétral masculin est composé de deux couches principales :

- La composante externe, constituée de muscle strié (le rhabdosphincter), est particulièrement développée autour de l'urètre membraneux. Elle s'amincit progressivement en direction de la vessie. En forme de fer à cheval inversé autour de l'urètre membraneux, elle se prolonge proximatement sur la face antérolatérale de la prostate. Les fibres musculaires striées se rejoignent en arrière de l'urètre, formant une raphé fibreuse centrale. Ce manchon musculaire s'étend du diaphragme urogénital jusqu'au sommet de la prostate.



**Figure 39:Le complexe sphinctérien urétral selon Mamdouh M. Koraitim**

- La composante interne, constituée de muscle lisse (le lissosphincter), est principalement située au niveau de l'orifice vésical et s'amincit progressivement le long de l'urètre. Ce sphincter forme un manchon musculaire circulaire complet autour de l'urètre [96].



**Figure 40: Coupe axiale de l'urètre sphinctérien**

### **3. Rôle fonctionnel du sphincter urétral :**

La continence urinaire dépend du maintien d'une pression intra-urétrale supérieure à la pression intra-vésicale, et ce, même en cas d'augmentation de la pression abdominale [110].

Grâce aux études urodynamiques, il a été identifié que la continence passive est assurée en grande partie par la contraction des fibres musculaires circulaires du lissosphincter urétral proximal, entraînant ainsi la fermeture du col vésical et le rétrécissement de l'urètre postérieur. Le rhabdosphincter distal, constitué de muscles striés, intervient de manière active en assurant une occlusion forcée de l'urètre, notamment lors des augmentations de la pression intra-abdominale, comme lors d'un effort, ou lors de l'interruption volontaire du jet urinaire [111].

Les travaux de Lapedes ont démontré que la paralysie isolée du rhabdosphincter ne compromet pas la continence passive. Cette observation souligne le rôle complémentaire du col vésical et du sphincter strié dans le maintien de la continence. Une incontinence urinaire de type "goutte à goutte" nécessite généralement une lésion combinée de ces deux structures [112].

Le sphincter urétral contribue au maintien de la continence en maintenant une pression urétrale supérieure à la pression vésicale, aussi bien au repos que lors d'augmentations de la pression intra-abdominale.

La microarchitecture du sphincter est adaptée à ses rôles spécifiques : le lissosphincter effectue la fermeture concentrique de l'urètre en conditions passives, tandis que le rhabdosphincter intervient lors des efforts ou de la miction volontaire. Ces caractéristiques ont été mises en évidence par l'imagerie par résonance magnétique (IRM) de diffusion, révélant des différences de structure et de densité des fibres [113].

L'incontinence urinaire post-prostatectomie est une complication majeure impactant significativement la qualité de vie. Pour la prévenir, diverses techniques de préservation du sphincter ont été développées, ciblant notamment le col vésical, le sphincter urétral externe et la musculature de l'urètre membraneux. Une préservation minutieuse des tissus péri-urétraux lors de la chirurgie peut réduire les risques d'incontinence post-opératoire, en maintenant l'intégrité structurelle et fonctionnelle du sphincter [115].

Schlomm et al. ont mis au point une technique chirurgicale visant à préserver l'intégralité du sphincter urétral. Cette technique consiste en une

dissection méticuleuse des composantes musculaires striée et lisse du sphincter, situées au sein de l'apex prostatique, jusqu'à atteindre le colliculus séminal. Grâce à cette approche, la totalité du système sphinctérien urétral est préservée, indépendamment de la morphologie de l'apex prostatique [114].

#### **IV. Anatomie zonale de la prostate :**

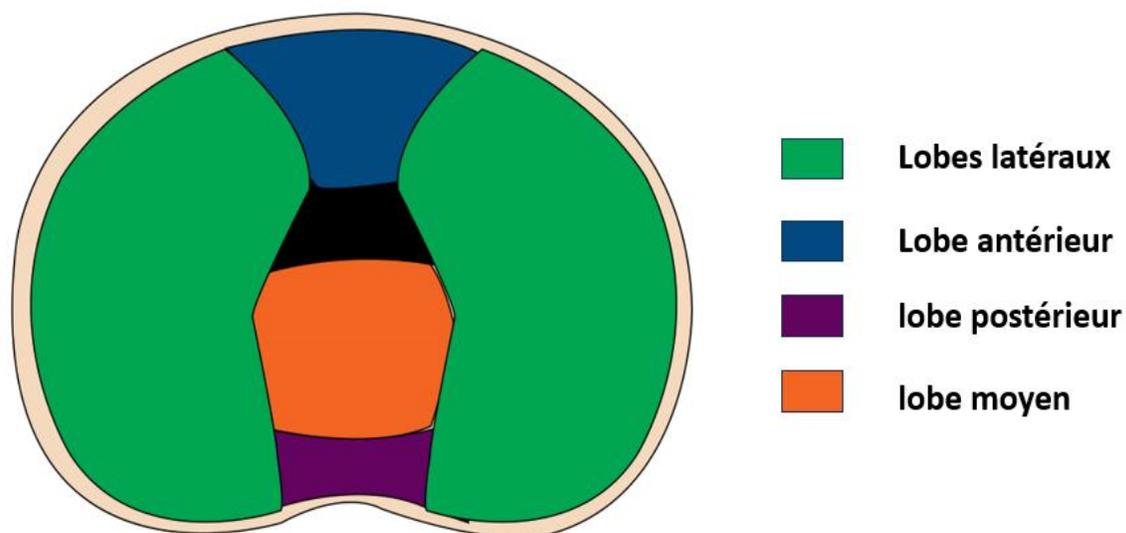
##### **1. Origines de l'anatomie zonale :**

Pour mieux comprendre l'origine des lobes moyen et postérieur de la prostate, comme l'avaient déjà fait d'autres chercheurs [115], Lowsley a étudié en 1912 des coupes de tissus fœtaux. Il a ainsi identifié cinq groupes distincts de canaux prostatiques issus du sinus urogénital (UGS), qu'il a qualifiés de 'lobes' [116] :



**Figure 41:Vue sagittale d'un modèle en cire de la prostate d'un nourrisson. Agrandissement x14.**

- **Lobe moyen** : Formés de 9 ou 10 tubules majeurs, ces éléments se ramifient et prennent leur origine au niveau du plancher de l'urètre, entre la vessie et les entrées des canaux éjaculateurs.
- **Deux lobes latéraux** : leurs Les tubules proviennent des sillons prostatiques et des parois latérales de l'urètre. Ils sont formés de 27 à 46 tubules qui s'étendent vers l'arrière, constituant ainsi la section principale de la base de la prostate.
- **Lobe postérieur ou dorsal** : Il s'agit d'une entité autonome formée de tubules qui émergent au niveau du fond de l'urètre prostatique, sous les orifices des canaux éjaculateurs.
- **Lobe antérieur ou ventral** : Sa taille reste considérable jusqu'à la seizième semaine, après quoi on observe une diminution marquée de sa taille ainsi que du nombre de ses tubules. Cette tendance a été constatée dans tous les échantillons microscopiques examinés, avec une réduction particulièrement prononcée dès la vingt-deuxième semaine [116].



### Coupe transversale

#### Figure 42: Coupe transversale de la prostate montrant les lobes prostatiques

Actuellement, la nomenclature couramment utilisée est celle de McNeal, qui divisa la prostate en trois zones principales, histologiquement et anatomiquement distinctes les unes des autres, remplaçant ainsi les modèles antérieurs basés sur les lobes par une description plus précise et fonctionnelle. Cette approche, basée sur des études histologiques et morphologiques approfondies, divise la prostate en différentes zones [117]. Ces régions présentent des origines embryologiques distinctes et se caractérisent par leur histologie, leurs repères anatomiques, leurs fonctions biologiques ainsi que leur vulnérabilité aux maladies [118].

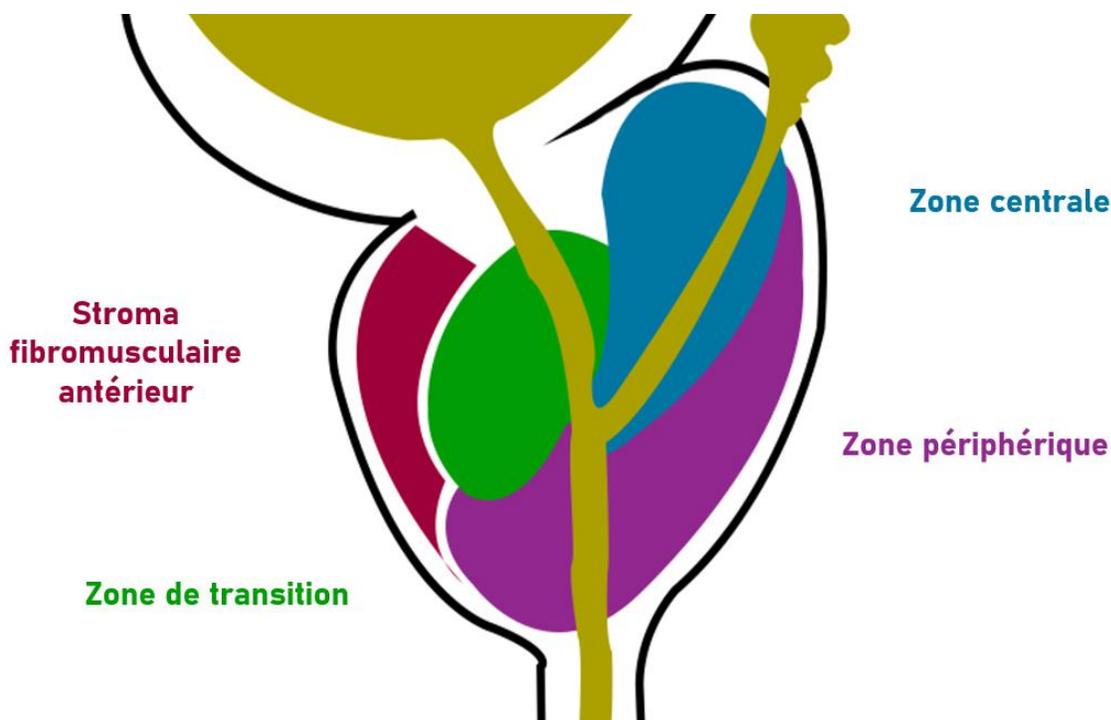


Figure 43: Anatomie zonale de la prostate selon McNeal

## 2. Zone périphérique (ZP) :

La zone périphérique constitue environ 70% du tissu glandulaire prostatique chez l'adulte. Elle se situe principalement autour de la partie distale de l'urètre prostatique et des canaux éjaculateurs. Les canaux de la zone périphérique naissent latéralement à partir de l'urètre, en dessous du **vérumontanum**, et se ramifient latéralement pour former une large portion de la glande. Les conduits les plus distaux se rejoignent vers la base de la prostate, formant une structure en disque dans un plan coronal [28,29]

En revanche, la zone centrale (CZ), issue du canal de Wolff, présente une incidence très faible de cancer de la prostate, similaire à une autre structure dérivée du canal de Wolff, les vésicules séminales. Étant donné les origines embryologiques uniques de la CZ et de la PZ, il n'est peut-être pas surprenant

qu'elles diffèrent largement en termes de susceptibilité à la carcinogénèse. Cette zone est d'une importance clinique particulière car elle est le site d'origine de la majorité des **cancers de la prostate**. En effet, 70% de tous les cancers de la prostate proviennent de cette zone dérivée du sinus urogénital [118].

Cette région constitue le principal foyer de la prostatite et du cancer de la prostate, mais non de l'hyperplasie bénigne de la prostate (HBP) qui se développe principalement au niveau de la zone de transition. Histologiquement, cette zone se caractérise par de petites unités acineuses, de forme ronde ou ovale, qui se déversent dans de longs canaux étroits émergeant directement des récessus postérolatéraux de la paroi urétrale en dessous du **vérumontanum**. Ces unités sont entourées d'un stroma formé de faisceaux musculaires disposés de manière lâche et entrelacés de façon aléatoire. Les canaux et les acini sont recouverts d'un épithélium cylindrique simple. Cette région se distingue par la présence du sphincter préprostatique (sphincter lisse), une structure cylindrique constituée de muscle lisse, qui s'étend de la base de la vessie jusqu'au verumontanum [121].

### **3. Zone centrale (ZC) :**

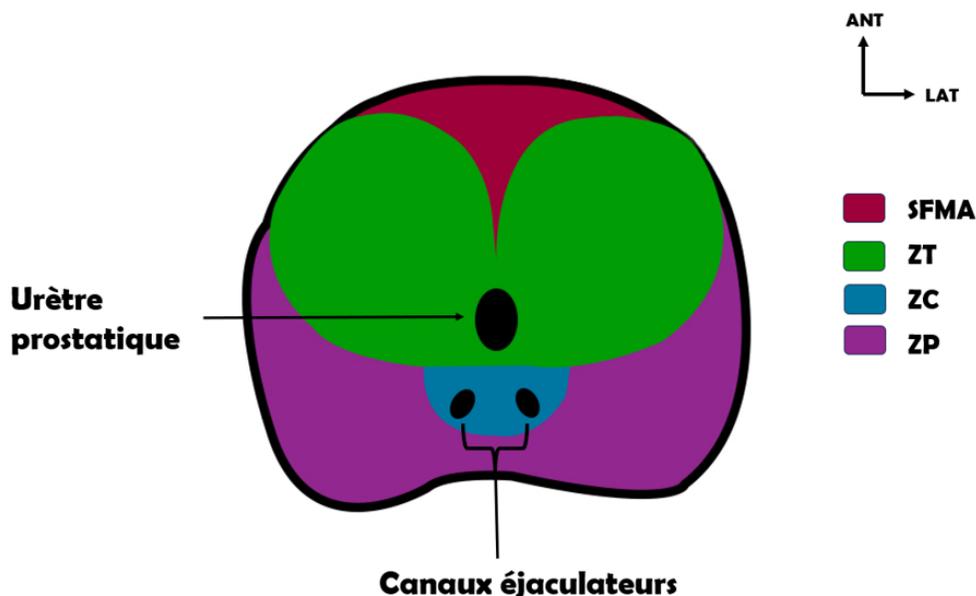
La **zone centrale** représente environ 25 % de la glande prostatique et entoure les **canaux éjaculateurs** à la base de la prostate. Cette zone est séparée de la zone périphérique par une frontière anatomique distincte, mais ses canaux se ramifient également latéralement et se développent autour des canaux éjaculateurs [119]. Contrairement à la zone périphérique, cette zone issue du canal de Wolff, présente une certaine **immunité relative au cancer**, similaire à une autre structure dérivée du canal de Wolff, les vésicules séminales [118].

L'anatomie histologique de la zone centrale diffère également de celle de la zone périphérique. Les acini, de forme polyédrique en section transversale, ainsi que les canaux, sont significativement plus volumineux et présentent un contour irrégulier. Le stroma musculaire y est beaucoup plus dense comparé à la zone périphérique. De plus, la zone centrale présente une incidence réduite de pathologies [121].

Bien que cette région présente un ratio significatif d'épithélium par rapport au stroma, représentant 40% du tissu épithélial de la prostate, elle semble presque résistante au développement de carcinomes, avec des pourcentages variants de 5 à 10% [122].

#### **4. Zone de transition (ZT) :**

La **zone de transition** est une région plus petite représentant environ 5% du volume glandulaire total de la prostate. Cette zone est située à proximité immédiate de l'urètre préprostatique et est souvent impliquée dans le développement de l'**hyperplasie bénigne de la prostate (HBP)**. Contrairement aux zones périphérique et centrale, la zone de transition se caractérise par un développement glandulaire limité, ses conduits étant confondus avec le sphincter musculaire lisse péri-urétral [119].



**Figure 44: Coupe transversale montrant l'anatomie zonale de la prostate**

L'échographie permet d'identifier facilement la zone de transition (ZT), qui apparaît globalement hypoéchogène en comparaison avec la zone périphérique (ZP) [122].

Cette région, en raison de son implication dans l'HBP, est particulièrement importante en pathologie. Les nodules hyperplasiques se développent presque exclusivement dans la zone de transition, ce qui entraîne une compression de l'urètre et des symptômes obstructifs urinaires typiques chez les patients atteints d'HBP [119]. La zone transitionnelle est le site d'origine de 25 % des cancers prostatiques [123]. Les cancers de la zone transitionnelle sont le plus souvent infracliniques et diagnostiqués fortuitement.

Sur le plan microscopique, la prolifération des tumeurs apparaît sous forme de formations nodulaires constituées de glandes, dont la disposition peut être soit très régulière, soit plus irrégulière, avec un cytoplasme clair et abondant. Les

lésions volumineuses de cette zone sont généralement faciles à diagnostiquer et peuvent être clairement observées sur une séquence T2. En revanche, les petites lésions (c'est-à-dire celles mesurant moins de 4cm<sup>3</sup>) peuvent être difficiles à distinguer de l'hyperplasie bénigne de la prostate, car elles peuvent ressembler à de simples nodules myomateux [124].

### **5. Stroma fibromusculaire antérieur (SFMA) :**

Le **stroma fibromusculaire antérieur** est une région non glandulaire qui constitue toute la surface antérieure de la prostate. Elle accroît considérablement l'épaisseur totale produisant la courbure caractéristique de sa surface antérieure lors d'une inspection externe. Ce tissu musculaire lisse est fusionné avec le muscle détroisor de la vessie et s'étend à partir du col vésical pour couvrir l'avant de la prostate jusqu'à l'apex.

**Apicalement**, cette structure se joint au sphincter interne du col vésical et se prolonge vers le bas, formant un tablier de tissu musculaire qui recouvre la surface antérieure de la prostate. À son extrémité distale, elle rejoint l'urètre au niveau de l'apex prostatique, s'intégrant à sa surface interne dans le muscle sphinctérien strié. Au cours de son parcours, elle s'étend latéralement pour fusionner avec la capsule le long de la bordure antérolatérale de la prostate.

Bien que cette région n'ait pas de rôle glandulaire, elle ajoute un soutien structurel important à la glande. En chirurgie, elle est d'une importance particulière car elle masque les zones glandulaires sous-jacentes, rendant leur dissection plus difficile [119].

## **V.L'anatomie fasciale :**

### **1.Introduction :**

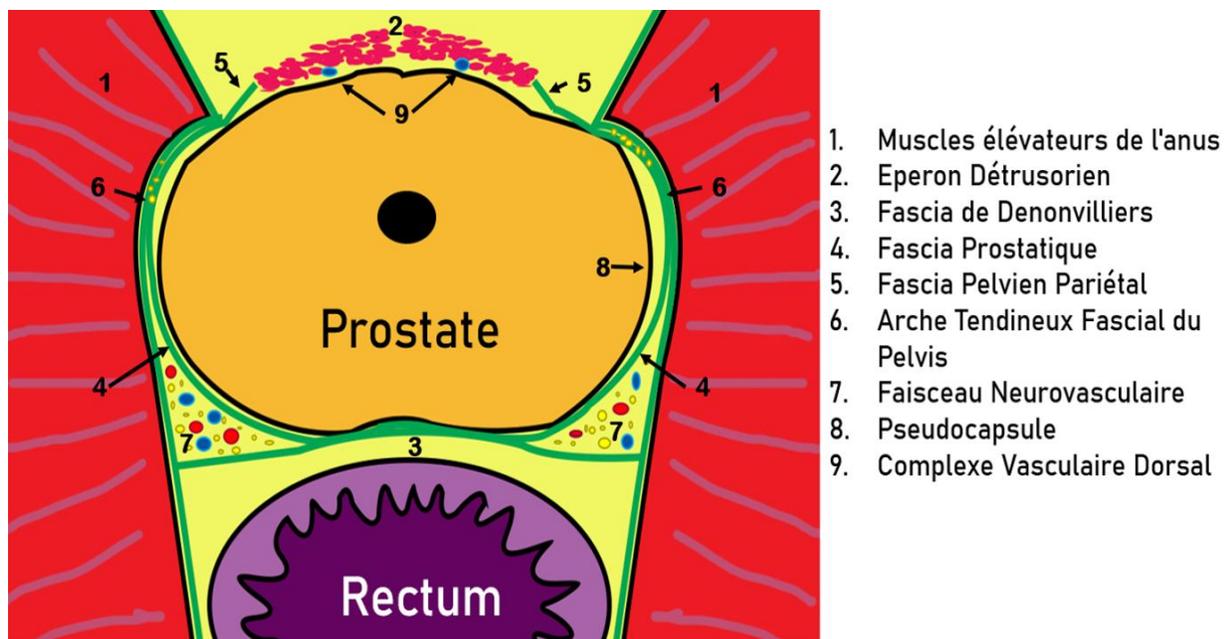
L'anatomie fasciale autour de la prostate est d'une grande importance pour les chirurgiens, ces structures déterminent en grande partie la façon dont la dissection doit être réalisée pour préserver les fonctions essentielles telles que la continence et l'érection. Une compréhension et connaissance claire des différentes couches fasciales qui entourent la prostate permet de mieux définir les plans de dissection et de minimiser les risques de complications.

En chirurgie, les fascias entourant la prostate revêtent une importance significative surtout dans le cadre de la prostatectomie radicale. La compréhension exacte de ces structures est essentielle pour préserver les fonctions nerveuses et gérer efficacement les marges oncologiques.

La loge prostatique est délimitée par trois fascias principaux [125,126] :

- Le fascia pelvien pariétal,
- Le fascia prostatique
- Le septum recto-vésical (fascia de Denonvilliers)

La compréhension de leur anatomie complexe est cruciale pour la pratique de la dissection.



**Figure 45: Coupe transverse montrant les structures fasciales distinctes entourant la prostate**

## **2. Le Fascia Pelvien Pariétal (FPP) :**

Conformément à la 'Terminologia Anatomica', les organes pelviens sont recouverts de deux types de fascias: pariétal et viscéral [127], la composante pariétale, décrite sous plusieurs noms, y compris le fascia pelvien latéral, le fascia pelvien supérieur, le fascia endopelvien, le fascia pariétal, le fascia de l'élévateur, le fascia para-pelvien et le fascia périprostatique, représente le feuillet le plus latéral de l'enveloppe prostatique, jouant un rôle crucial dans la stabilisation et la délimitation de la loge prostatique. Il est intimement lié au muscle élévateur de l'anus en particulier au faisceau ilio-coccygien qu'il recouvre partiellement, raison pour laquelle il est désigné sous les noms de fascia de l'élévateur de l'anus ou aponévrose de l'élévateur de l'anus dans la littérature chirurgicale [128], il

enveloppe les muscles : obturateur interne, piriforme, élévateur de l'anus et coccygien, tout en étant en continuité avec le fascia transversalis [129].

Ce fascia recouvre les bords latéraux de la prostate et se réfléchit sur le fascia prostatique pour constituer l'arcade ou l'arche tendineux fascial du pelvis (ATFP). Cet épaissement conjonctif s'étend de l'épine ischiatique aux ligaments pubo-prostatiques [104].

L'ATFP constitue un repère chirurgical important. L'incision en dehors de cette arcade crée un plan de dissection en contact avec les fibres musculaires du muscle élévateur de l'anus, ce qui entraîne un risque élevé de créer des adhérences sur la partie latérale de la prostate. À l'inverse, lorsque l'incision est effectuée à l'intérieur de l'ATFP, la dissection se fait au contact du fascia prostatique, laissant les fibres musculaires du muscle élévateur de l'anus complètement recouvertes par le FPP [128].

Le FPP est fondamental en chirurgie de la prostate en raison de sa relation intime avec les nerfs caverneux, qui assurent l'innervation végétative du pénis. Ces nerfs, qui émergent du plexus hypogastrique inférieur, se situent à la jonction entre le FPP, le fascia prostatique et le septum et le fascia de Denonvilliers [130].

La maîtrise de la position exacte du fascia pelvien pariétal (FPP) permet aux chirurgiens d'effectuer des dissections intrafasciales ou interfasciales en toute sécurité, optimisant ainsi la préservation des nerfs tout en réduisant les risques de complications opératoires. Cette précision minimise les saignements et prévient les complications vasculaires, car le fascia contient des vaisseaux

sanguins et des structures lymphatiques essentiels à l'irrigation et au drainage des tissus prostatiques et pelviens [128].

### **3. Fascia Prostatique :**

Le fascia prostatique, également appelé fascia pelvien latéral [131,132], fascia périprostatique [98,126,133] et fascia para-pelvien [134,135], est une enveloppe conjonctive qui recouvre directement la prostate et joue un rôle essentiel dans la préservation des fonctions nerveuses et vasculaires de la région pelvienne. En tant que composante viscérale du fascia pelvien [128], il est essentiel à la stabilisation de la prostate, en particulier lors de procédures chirurgicales telles que la prostatectomie radicale. Ce fascia se situe entre la « capsule prostatique » et le fascia pelvien pariétal [129], formant ainsi une interface clé dans l'anatomie pelvienne.

Bien que l'on ait longtemps pensé que le fascia prostatique était constitué de deux couches, interne et externe, des études récentes ont mis en lumière sa véritable nature histologique. Ce fascia se présente comme un tissu conjonctif composé d'un mélange de fibres collagéniques, de tissus adipeux, de nerfs et de vaisseaux sanguins [41,45,46], les relations entre le fascia prostatique et la capsule prostatique ont été étudiées dans le cadre d'une étude histologique réalisée par Keijiro Kiyoshima sur soixante-dix-neuf échantillons de prostatectomies radicales sans préservation nerveuse. Bien que des variations dans la quantité de tissu adipeux aient été observées entre ces structures, le LPF et la CAP étaient systématiquement connectés et fusionnés. Dans 41 cas (52%), le FP était éloigné de la capsule prostatique, l'espace entre les deux étant occupé

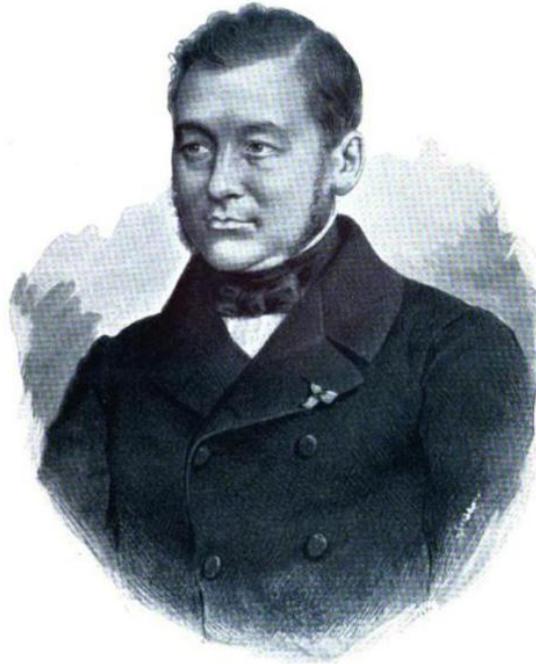
par du tissu adipeux. En revanche, dans les 38 cas restants (48 %), le FP était fusionné avec la capsule prostatique, avec une présence minimale de tissu adipeux entre les deux [132].

La relation du fascia prostatique avec les autres structures est variable :

- **Faces latérales** : Le fascia prostatique est en général clivable de la prostate, ce qui permet de définir des plans de dissection. Il se replie au niveau de l'arcade tendineuse du fascia pelvien (ATFP) où il fusionne partiellement avec le fascia pelvien pariétal.
- **Face antérieure** : Il se situe entre la zone fibromusculaire de la prostate et le plexus veineux prostatique de Santorini, offrant une certaine protection contre les lésions vasculaires.
- **Face postérieure** : Le fascia prostatique fusionne avec le septum rectovésical (fascia de Denonvilliers), créant une barrière naturelle entre la prostate et le rectum essentiel pour limiter la propagation des tumeurs prostatiques vers le rectum [138].

#### **4. Le Fascia de Denonvilliers :**

Le fascia de Denonvilliers, également désigné sous le nom de septum rectovésical, a été initialement décrit en 1836 par Charles-Pierre Denonvilliers, un chirurgien et anatomiste français né à Paris en 1808. Tout au long de sa



**Figure 46: Charles-Pierre Denonvilliers**

carrière, il s'est dédié à la recherche scientifique ainsi qu'à l'enseignement de l'anatomie. En 1837, un an après sa première observation, il présente pour la première fois cette structure située entre la prostate et le rectum, qu'il nomme « couche prostatopéritonéale » [139].

Un an après, en 1837, il aborda cette aponévrose dans sa thèse « propositions et observations d'anatomie, de physiologie et de pathologie » avec une analyse plus détaillée :

”En arrière de la prostate, entre les vésicules séminales et le rectum, existe **une couche membraneuse** bien distincte, que j'appelle *prostatopéritonéale*. Voici quelle est sa disposition : Des deux côtés elle se fond avec le tissu cellulaire serré qui entoure les plexus veineux du bas-fond de la vessie ; par son bord antérieur, elle se perd sur l'extrémité la plus reculée de la prostate ; par son bord postérieur elle adhère à cette portion du péritoine qui descend entre la vessie et le rectum. ... La face inférieure qui touche au rectum lui adhère à peine par un tissu cellulaire très-lâche ; De la face supérieure s'élèvent, au contraire, des prolongements cellulaires assez denses qui enveloppent les vésicules séminales.” [140].

Au cours des années 1940, Tobin et Benjamin ont mené des recherches histologiques approfondies, démontrant que le revêtement mésenchymateux prérectal se transforme en fascia rectal propre [141]. Ils ont observé que Denonvilliers avait correctement reconnu cette couche tissulaire mais qu'il ne l'avait pas catégorisée comme intégrant l'aponévrose prostatopéritonéale. Par conséquent, ils ont déclaré qu'elle ne pouvait pas être techniquement qualifiée de partie intégrante du fascia de Denonvilliers, et ils ont admis que : ” ... étant donné que ce tissu est considéré comme faisant partie du fascia de Denonvilliers dans la littérature clinique et pour des raisons de simplicité, nous suggérons que ce fascia autour du rectum soit désigné comme la couche postérieure du fascia de Denonvilliers. La membrane fibreuse dérivée du cul-de-sac péritonéal pourrait donc être désignée comme la couche antérieure du fascia de Denonvilliers. Cette terminologie aiderait à clarifier les descriptions de ces couches fasciales.” [141].

Depuis, plusieurs auteurs ont réfuté cette description, parmi eux Lindsey et al., qui, après avoir examiné la littérature existante, sont arrivés à la conclusion que le fascia de Denonvilliers est un fascia unicouche et que la couche postérieure précédemment décrite est en réalité le fascia rectal propre [142].

Dans une autre étude, vingt-cinq cadavres masculins, âgés de 72 à 95 ans, ont été examinés pour analyser la structure du fascia de Denonvilliers (FD). Les chercheurs ont réalisé des coupes horizontales (15 cadavres) et sagittales (10 cadavres) à intervalles de 2 à 5 mm. Les tissus ont ensuite été colorés avec l'hématoxyline-éosine, Elastic-Masson, ainsi qu'avec des techniques immunohistochimiques pour identifier les tissus conjonctifs (via l'alpha-actine de muscle lisse) et les nerfs (via la protéine S100).

L'étude a révélé que le FD est constitué de tissu conjonctif lâche et désorganisé, avec des structures semblables à des « feuilles » entrelacées, représentant des fibres élastiques ou musculaires lisses. Certaines « feuilles » du FD fusionnaient en avant avec la capsule prostatique et/ou en arrière avec le fascia propre du rectum [143].

Le fascia de Denonvilliers joue un rôle essentiel dans la préservation des fonctions érectiles et urinaires. Tzelves et al. mettent en évidence la proximité de ce fascia avec bandelettes neurovasculaires qui innervent la prostate et les organes environnants. Ces faisceaux, contenant les nerfs caverneux responsables de la fonction érectile, sont situés en postérolatéral de la prostate, au point de jonction entre le fascia de Denonvilliers et le fascia endopelvien (FPP).

La conservation de ce fascia est donc cruciale pour maintenir ces fonctions nerveuses lors des interventions chirurgicales.

Phé et Sebe ont souligné l'importance de préserver l'intégrité du fascia de Denonvilliers lors des prostatectomies radicales afin de réduire les risques de complications postopératoires telles que l'incontinence et la dysfonction érectile [128]. Hinata et al. confirment que ce fascia constitue un plan de dissection sûr, permettant de préserver les structures neurovasculaires essentielles à la continence et à la fonction érectile [138].

### **5. Capsule prostatique :**

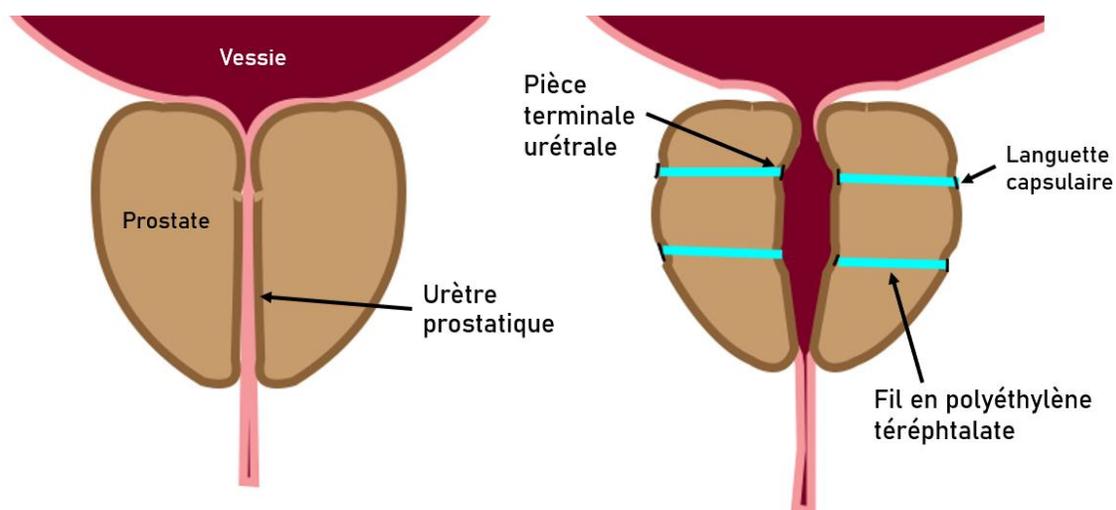
La région la plus superficielle de la prostate est constituée d'une couche fibro-musculaire plutôt que d'une capsule distincte [145], cette structure, souvent appelée "capsule", correspond en réalité à une couche de tissu conjonctif dense, riche en fibres musculaires lisses, qui entoure le parenchyme glandulaire de la prostate. Son épaisseur et sa composition peuvent varier d'un individu à l'autre, et elle se mêle progressivement aux tissus périprostatiques, rendant la délimitation précise de la glande difficile.

Si au niveau microscopique, on parle plutôt de "muscle lisse condensé" ou de "bord externe de la prostate", la pratique chirurgicale, surtout lors de la prostatectomie radicale, révèle souvent une structure macroscopique bien définie, assimilable à une capsule, facilitant ainsi la dissection [135].

La préservation de la capsule prostatique lors de la cysto-prostatectomie est une technique qui fait débat. Certains auteurs suggèrent qu'elle pourrait améliorer la continence et la fonction érectile [145], tandis que d'autres n'ont pas

observé de différence significative en termes de résultats fonctionnels ou oncologiques par rapport aux techniques standard [146].

La technique UroLift tire parti des contrastes morphologiques des tissus prostatiques, notamment la rigidité de cette couche fibro-musculaire. Cette rigidité, associée à la souplesse de l'urètre et à la compressibilité du tissu glandulaire spongieux, offre un ancrage solide aux implants. Ces derniers, en s'appuyant sur la capsule, écartent mécaniquement les lobes prostatiques, agrandissant ainsi le canal urétral et améliorant le débit urinaire [182].

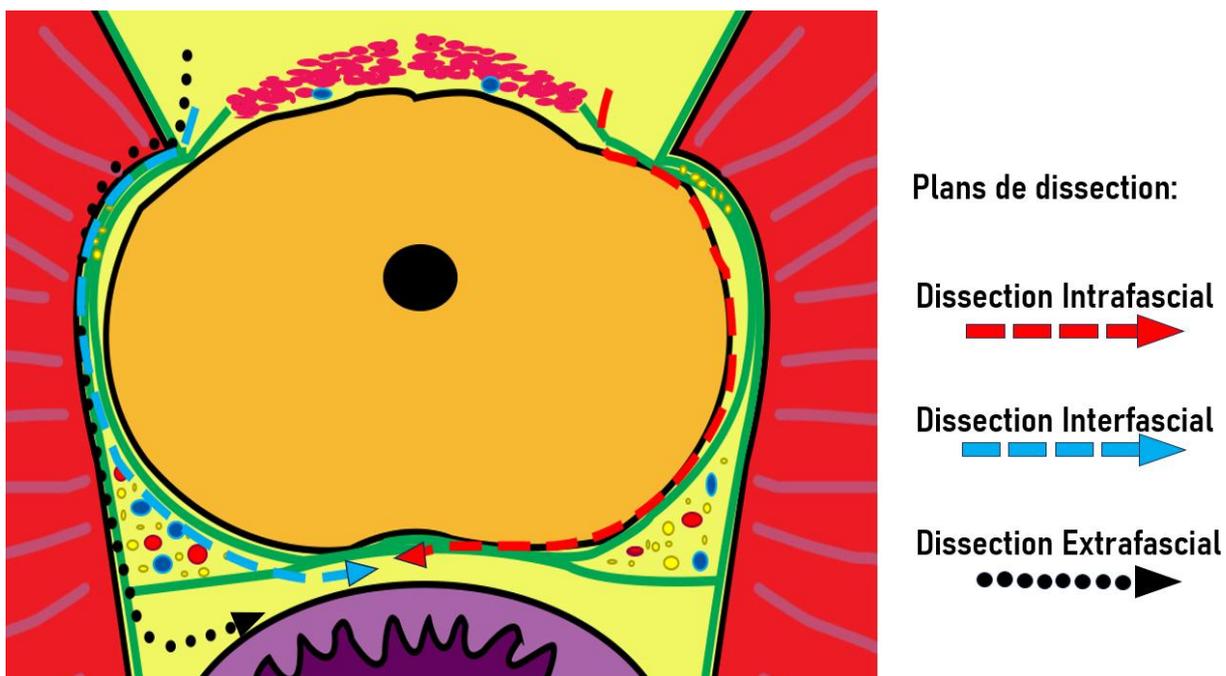


**Figure 47: Principe de la technique UroLift**

## 6. Implications Chirurgicales des Fascias Prostatiques :

### • Plans de Dissection :

Selon l'emplacement de la tumeur et la préservation souhaitée des nerfs, différents plans de dissection sont utilisés : intrafascial, interfascial et extrafascial. Le choix du plan de dissection influence directement les marges chirurgicales et la récupération de la fonction érectile. Une dissection interfasciale est souvent privilégiée pour maintenir un équilibre entre l'efficacité oncologique et la préservation des structures neurovasculaires [147].



**Figure 48: Les différents plans de dissection.**

### • Techniques de Préservation des Nerfs et Dissection Progressive

- La préservation des faisceaux neurovasculaires est essentielle pour limiter la dysfonction érectile postopératoire. Des techniques de dissection délicates, adaptées à l'anatomie individuelle, permettent

de réduire les traumatismes et d'optimiser les résultats fonctionnels [147].

## **VI. Vascularisation de la Prostate : Artères, Plexus Veineux**

### **Dorsal et Artère Pudendale Accessoire :**

#### **1. Vascularisation artérielle :**

##### **1.1. Les principales sources artérielles de la prostate :**

En 1955, Clegg a mené une recherche anatomique concernant la vascularisation artérielle de la prostate en se basant sur l'examen de 21 cadavres [148]. Il a souligné que dans l'ensemble des cas étudiés, la vascularisation de la glande prostatique était assurée par une branche prostatique provenant d'une artère qu'il a appelée « artère prostatovésicale », un tronc clairement identifiable, bien que son origine puisse différer [148].

Il a également noté qu'environ la moitié des échantillons montrait que cette artère ne comportait que des branches prostatiques ou de petites artères vésicales inférieures, tandis que dans l'autre moitié, elle fournissait à la fois des branches prostatiques et des branches vésicales inférieures de tailles comparables. Cette artère suivait une trajectoire oblique, se dirigeant vers le bas, vers l'avant et vers le milieu, le long de la surface antéro-inférieure de la vessie en direction de la glande prostatique. L'artère vésico-prostatique présente plusieurs bifurcations inconstantes [148] :

- L'artère vésicale inférieure : branche inconstante (50%).
- L'artère prostatique : branche constante de ce tronc.

- L'artère vésiculaire postérieure : un vaisseau qui irrigue la face postérieure de la vésicule séminale, décrite par Clegg dans 57% des cas.

Clegg a également noté que l'extrémité de l'artère prostatique était accompagnée d'un faisceau de petits vaisseaux, responsables de l'irrigation du plancher pelvien, dont certaines ramifications s'étendaient vers le rectum et le canal anal [148]. D'autres artères pouvant occasionnellement alimenter la prostate comprennent l'artère rectale postérieure ainsi que l'artère vésiculo-déférentielle et l'artère vésiculaire. Néanmoins, ces 2 derniers irriguent principalement la vésicule séminale [148].

En 1959, Bouissou et Talazac ont étudié l'anatomie vasculaire de la prostate en analysant 100 moitiés pelviennes en comparant l'anatomie des artères prostatiques chez des individus en bonne santé et ceux souffrant d'hypertrophie prostatique ou d'hyperplasie bénigne de la prostate (HBP), ainsi que chez des patients atteints de cancer de la prostate. Ils ont été les pionniers dans l'identification de deux artères prostatiques distinctes situées de part et d'autre du pelvis :

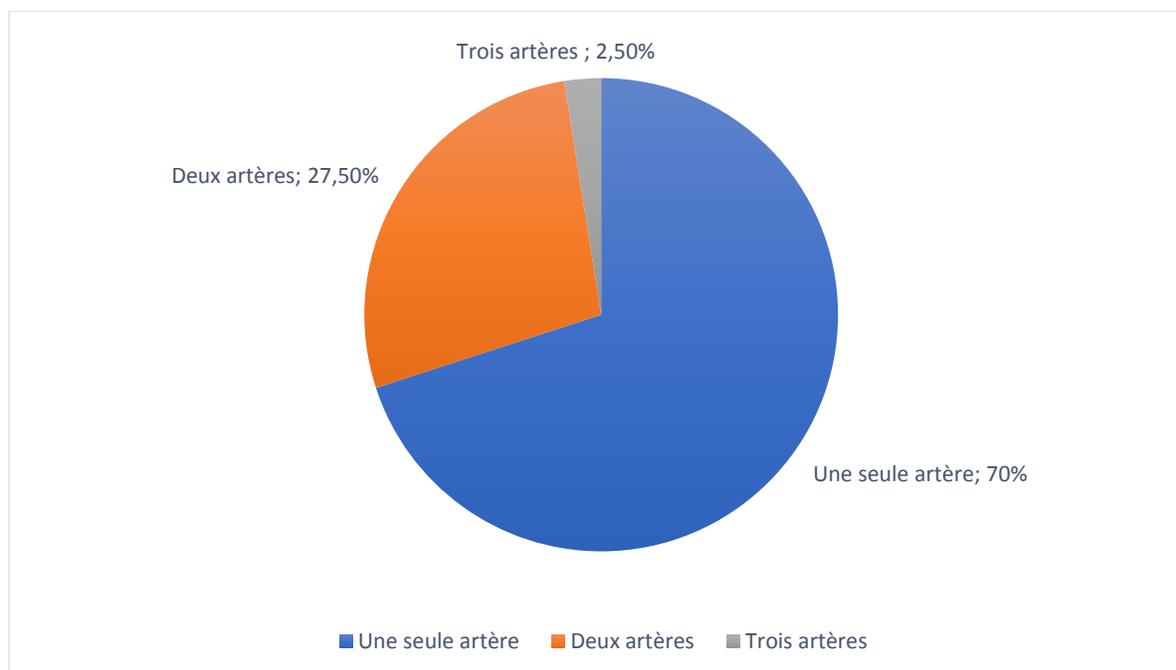
- L'une de ces artères, désignée sous le nom d'**artère vésico-prostatique**, assure l'irrigation de la base de la vessie ainsi que de la partie interne et supérieure de la glande prostatique. Il a été observé que cette artère était souvent hypertrophiée chez les patients souffrant d'hyperplasie bénigne de la prostate (HBP), ce qui a conduit à son appellation alternative "artère de l'adénome".

- L'autre artère prostatique, désignée sous le nom d'**artère caudale**, entretenait une connexion étroite avec l'artère rectale moyenne et fournissait principalement du sang à la partie périphérique et caudale.

L'artère vésico-prostatique passait entre la base de la vessie et la prostate, tandis que l'artère caudale longeait la capsule prostatique, en périphérie, entre le rectum et la surface postérieure de la prostate, pour se terminer dans le périnée [149].

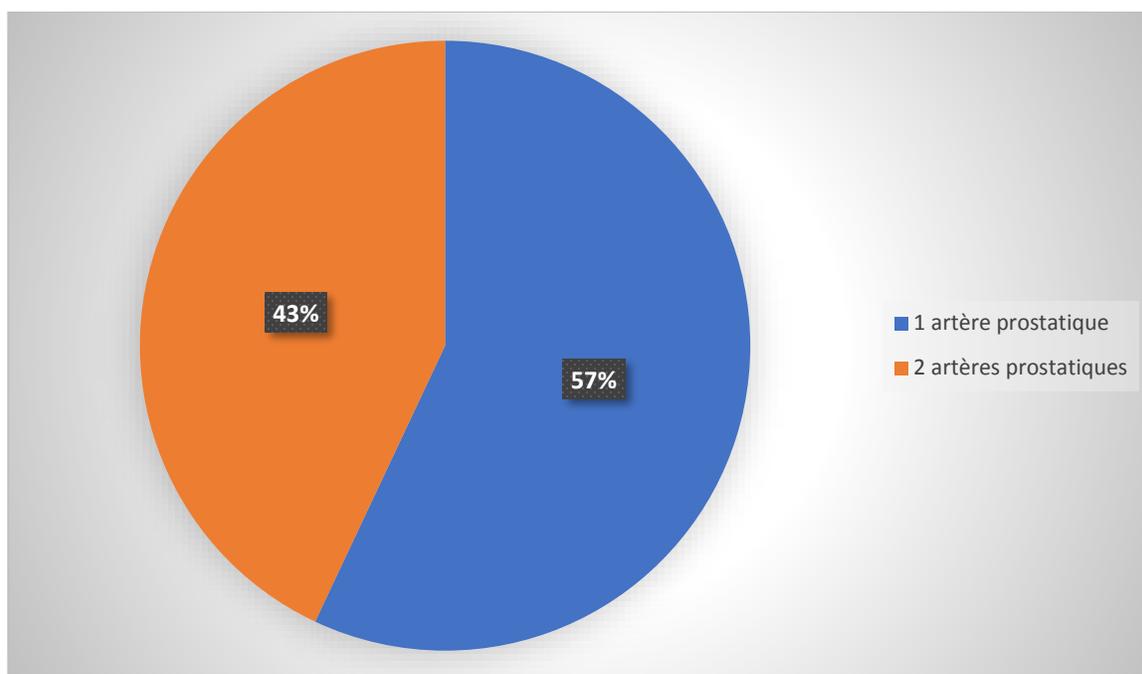
Ambrosio et al. ont étudié, en 1980, 40 moitiés pelviennes et ont trouvé [151]:

- Une seule artère prostatique dans 70% des cas (n = 28)
- Deux artères prostatiques dans 27,5% des cas (n = 11)
- Trois artères prostatiques dans 2,5 % des cas (n = 1)



**Graphique 6:Nombre d'artères prostatiques par moitié pelvienne**

Une étude menée par le docteur Tiago Bilhim en 2012 a examiné l'angiographie pelvienne par tomодensitométrie et l'angiographie numérique soustractive (DSA) des artères iliaques internes [150]. Il a été possible d'identifier les artères prostatiques (AP) indépendantes, leur origine, leur parcours, leur pénétration dans la capsule et leur terminaison. Les résultats ont montré qu'une AP était présente dans 57% des cas pelviens ( $n = 86$ ), tandis que deux AP indépendantes ont été observées dans les 43% restants ( $n = 64$ ), totalisant ainsi 214 AP.



#### Graphique 7: Nombre d'artères prostatiques indépendantes/ moitié pelvienne

Chaque patient avait **en moyenne  $2,9 \pm 0,9$  AP indépendantes**, avec une plage variant de **2 à 4 AP**, et un diamètre moyen de  $1,6 \text{ mm} \pm 0,3$ .

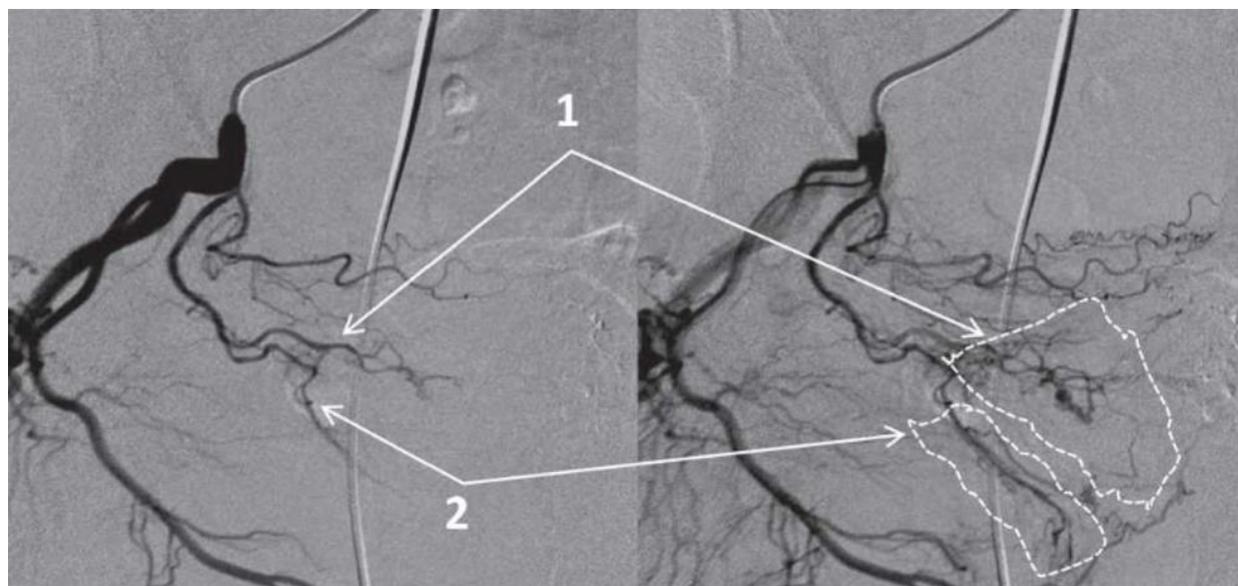
En cas d'artères prostatiques uniques :

Avant d'atteindre la capsule prostatique, ces artères se divisent en deux branches à des distances variables de leur point d'origine :

- **Une branche antéro-latérale** : suit une trajectoire en haut et en avant, pénétrant la capsule prostatique aux positions approximatives de 2 heures à gauche et 10 heures à droite, et fournit la majorité de l'irrigation à la partie centrale de la glande.
- **Une branche postéro-latérale** : suit une trajectoire plus postérieure et inférieure, pénétrant la capsule prostatique aux positions approximatives de 5 heures à gauche et 7 heures à droite, et se charge principalement de l'irrigation de la partie périphérique.

Dans les cas où deux artères prostatiques (AP) indépendantes :

- L'AP antéro-latérale avait une origine supérieure/proximale provenant du tronc commun gluteo-pudendal, souvent proche ou associée à l'artère vésicale supérieure, et était principalement responsable de l'irrigation de la partie centrale de la glande.
- L'AP postéro-latérale, quant à elle, émergeait de manière inférieure/distale de l'artère pudendale interne, au-dessus de l'échancre sciatique, et irriguait la partie périphérique [150].



**Figure 49: Branche antéro-latérale (1) / Branche postéro-latérale (2) ainsi que les zones qu'elles irriguent**

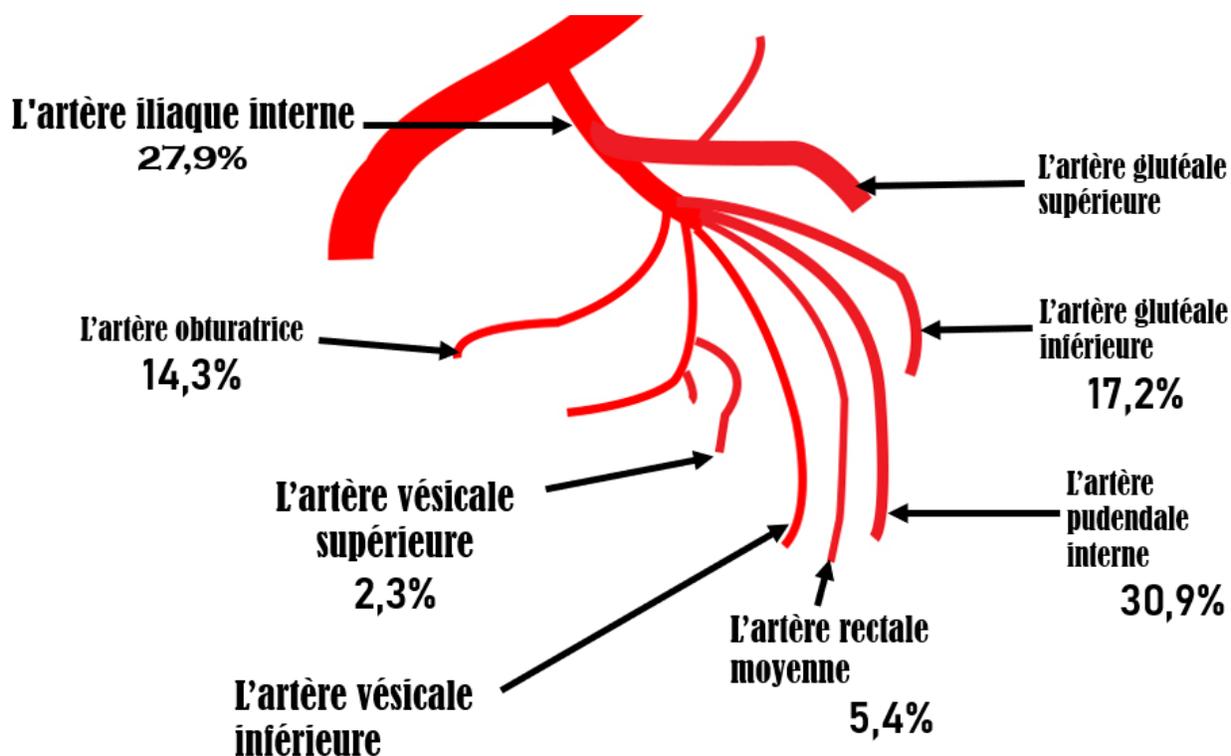
Les études modernes, notamment celles utilisant l'angiographie par tomodensitométrie et l'angiographie numérique soustractive, révèlent deux pédicules prostatiques principaux : un pédicule antéro-latéral (ou vésico-prostatique) et un pédicule postéro-latéral. Ces pédicules artériels peuvent soit provenir d'une même artère dans 60 % des cas, soit de deux artères indépendantes dans 40 % des cas. Le pédicule antéro-latéral, qui naît souvent de l'artère vésicale supérieure, irrigue principalement la glande centrale et les nodules hyperplasiques de la prostate. Le pédicule postéro-latéral, quant à lui, irrigue principalement la glande périphérique et caudale, et peut être en relation étroite avec les branches rectales [150].

### **1.2. L'origine des artères prostatiques :**

L'origine de l'artère prostatique montre également une importante variation interindividuelle. Dans le cadre d'une étude portant sur 168 patients,

une angiographie par tomodensitométrie multi coupes des organes pelviens a été réalisée en préopératoire afin de déterminer le type d'angio-architecture prostatique, révélant ainsi les différentes origines de l'artère prostatique :

- L'artère pudendale interne (API) (30,9%)
- La section antérieure de l'artère iliaque interne (AII) (27,9%)
- L'artère glutéale inférieure (AGI) (17,2%)
- L'artère obturatrice (AO) (14,3%).
- L'artère rectale moyenne (ARM) (5,4%)
- L'artère vésicale supérieure (AVS) (2,3%).



**Figure 50: Les différentes origines de l'artère prostatique.**

Une angio-architecture des deux côtés a été révélée chez 14,3 % (24) des patients, tandis que les 85,7 % (144) restants présentaient une asymétrie

architecturale. L'absence d'anastomoses des artères prostatiques a été détectée dans 75,5 % (254) des côtés pelviens [152].

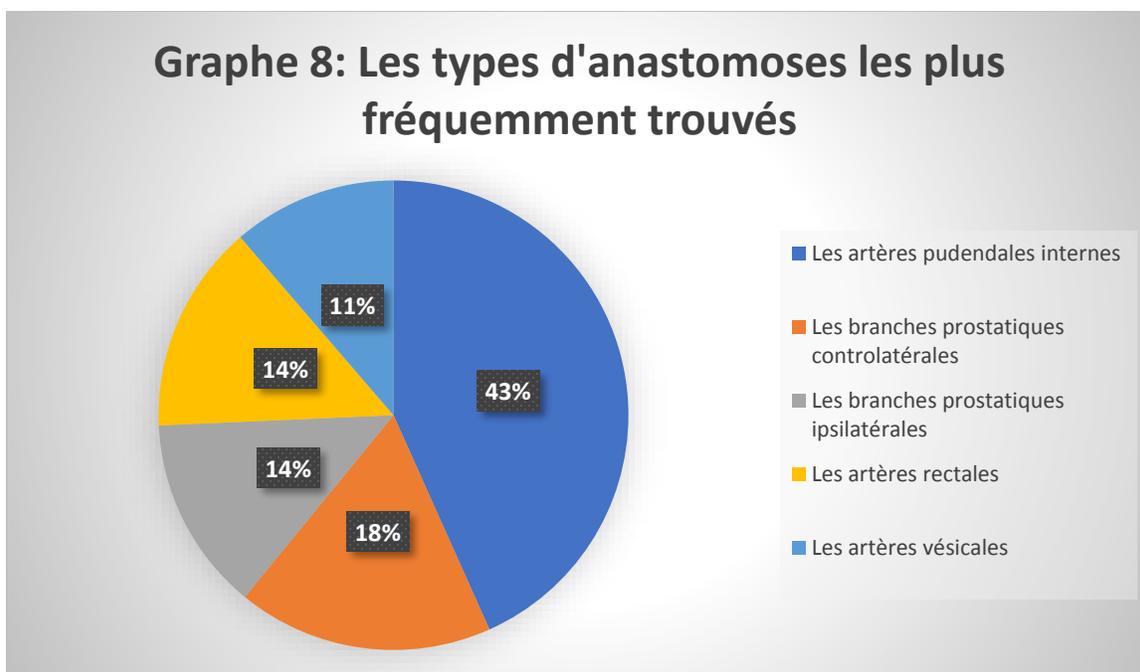
### **1.3. Variabilité et anastomoses artérielles :**

Parmi les caractéristiques majeures de la vascularisation prostatique, on note la présence fréquente d'anastomoses artérielles avec les artères voisines. Ces connexions sont observées dans environ 24,4 % des cas et peuvent inclure des relations avec les artères rectales, les artères vésicales et les artères péniennes [152].

Une autre recherche a démontré qu'aucune anastomose n'était présente dans 43% des côtés pelviens, alors que des anastomoses avec des artères environnantes ont été constatées dans 57 % des cas [150].

Les types d'anastomoses les plus fréquemment trouvés étaient avec :

- Les artères pudendales internes (43,3%)
- Les branches prostatiques controlatérales (17,6%)
- Les branches prostatiques ipsilatérales (13,4%)
- Les artères rectales (14,4%)
- Les artères vésicales (11,3%)



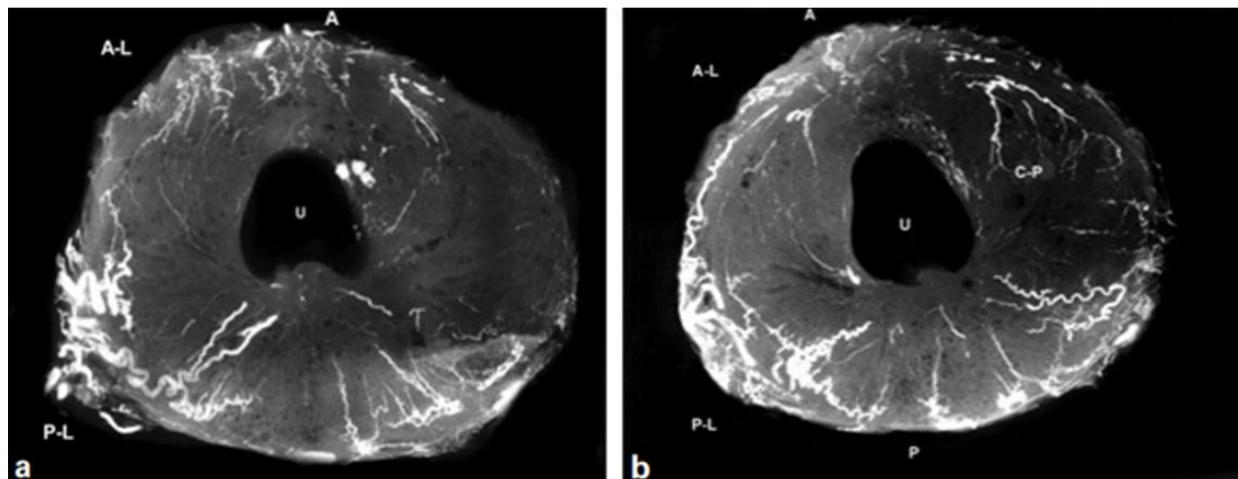
**Graphique 8: Les types d'anastomoses les plus fréquemment trouvés**

Ces variations et anastomoses artérielles nécessitent une attention particulière lors de procédures comme l'embolisation artérielle prostatique, afin d'éviter une ischémie non ciblée des organes voisins comme la vessie, le rectum ou encore le corps caverneux [150], ce qui souligne l'importance d'une évaluation préopératoire approfondie pour éviter les blessures vasculaires pendant l'intervention [104].

#### **1.4. Vascularisation Intraprostatique : Anatomie et Microangiologie de la Prostate :**

Dans la recherche réalisée par M. Slojewski en 2002, dix glandes prostatiques ont été extraites lors de cystoprostatectomies et de prostatectomies radicales. Les artères prostatiques ont été soigneusement disséquées, cathétérisées et soumises à une injection de Micropaque afin de permettre une

visualisation précise de la vascularisation. Par la suite, les échantillons ont été fixés et soumis à des radiographies [153].



**Figure 51:Microangiogrammes de la prostate montrant :**

**a : l'urètre (U), les groupes de vaisseaux : antérieurs (A), antérolatéraux (A-L) et postérolatéraux (P-L)**

**b : vaisseaux péri-urétraux concentriques (C-P)**

Les données obtenues soutiennent les travaux de Clegg [148] et les recherches précédentes, révélant que la micro-vascularisation de la prostate est principalement issue de trois groupes artériels :

- Capsulaires
- Intermédiaires
- Péri-urétrales

À la surface, les vaisseaux capsulaires sont structurés en un groupe antérieur et un groupe postérieur, accompagnés de sous-groupes antérolatéraux et postérolatéraux localisés aux positions de 1, 5, 7 et 11 heures autour de la

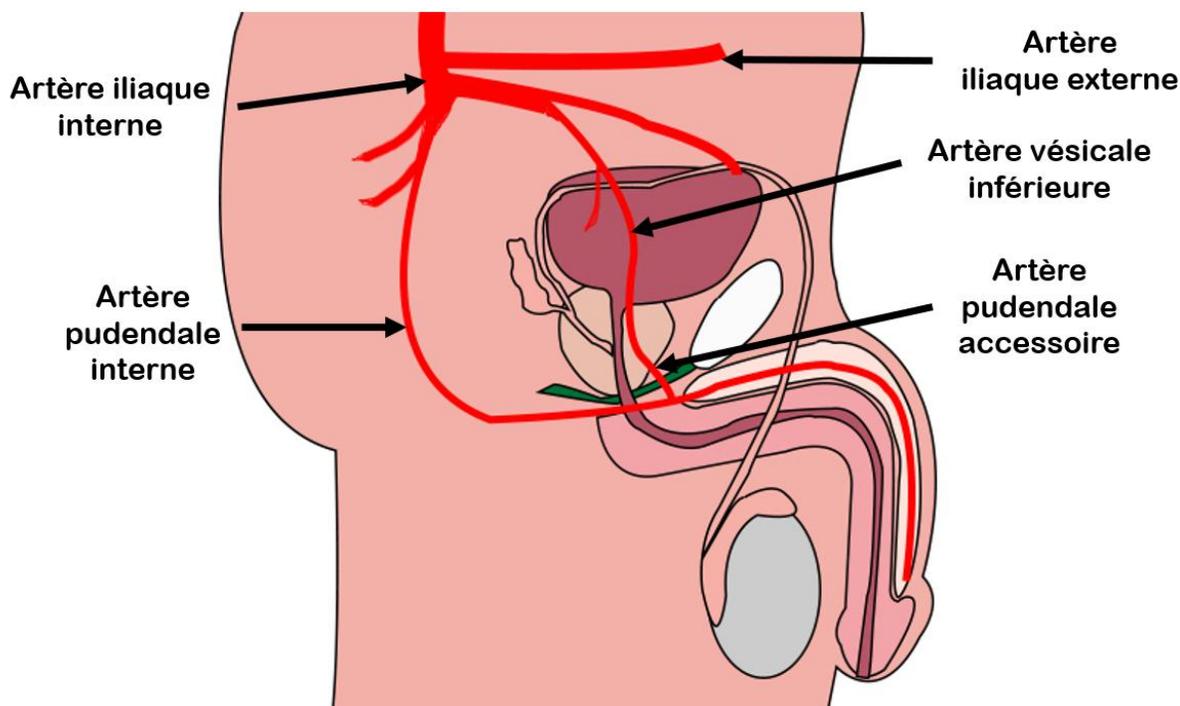
capsule. Les capillaires circulent le long de la « capsule chirurgicale » et se dirigent principalement de façon concentrique vers l'urètre.

Il existe une tortuosité marquée et plusieurs anastomoses entre les groupes antérolatéral et postérolatéral du même côté ainsi que du côté contralatéral surtout à 1–2 mm sous la capsule. Le groupe antérolatéral de la commissure antérieure se dirige directement vers la région urétrale. Les artéριοles constituant le plexus urétral sont particulièrement visibles au niveau du verumontanum et à l'entrée des canaux éjaculateurs ainsi que de l'utricule prostatique dans l'urètre. Les artères postérieures et postérolatérales irriguent la paroi postérieure de l'urètre et le verumontanum, créant des anastomoses qui assurent l'alimentation de la paroi urétrale à plusieurs niveaux [153].

## **2. Les artères pudendales accessoires :**

### **2.1. Rôle des artères pudendales accessoires :**

En plus des artères prostatiques, les **artères pudendales accessoires** peuvent être présentes dans 4 à 75% des cas [154]. Les artères pudendales accessoires se trouvent au-dessus du diaphragme pelvien, traversant la région rétro-pubienne avant de pénétrer dans le hile pénien [104], apportant un flux sanguin supplémentaire aux corps caverneux du pénis. Ces artères peuvent être critiques pour la fonction érectile, notamment lorsqu'elles sont la principale source de vascularisation artérielle du pénis. En raison de leur localisation supra-diaphragmatique, elles courent un risque accru de lésion durant l'intervention d'extirpation de la prostate.



**Figure 52: Artère pudendale accessoire**

Suite à l'implémentation de la technique de préservation des nerfs par le Dr Walsh, une réduction significative du nombre de patients présentant des troubles érectiles en post-opératoire a été observée. Néanmoins, certains cas continuaient de rencontrer cette complication, ce qui a suscité des recherches complémentaires afin d'en identifier les causes sous-jacentes.

A cette raison, une étude a été menée sur 23 patients atteints de dysfonction érectile après une prostatectomie radicale rétropubienne. Parmi eux, 21 avaient subi une prostatectomie avec préservation des nerfs, tandis que 2 avaient eu une prostatectomie radicale standard. Une injection de 60 mg de papavérine a été administrée dans le corps caverneux pour évaluer la tumescence. Le niveau d'érection a été mesuré en termes de rigidité et d'angle d'inclinaison avec une évaluation clinique.

Tous les patients ont présenté une tumescence post-injection, mais seul un patient (5%) a retrouvé une érection complète comparable à celle d'avant l'opération. Sur les 18 patients initialement potents ayant bénéficié d'une préservation nerveuse, 8 (44%) ont retrouvé une fonction érectile suffisante pour des rapports sexuels. En revanche, 10 patients (53%) ayant été potents avant l'opération et 12 (57%) dans le groupe ayant bénéficié de la préservation des nerfs ont éprouvé des érections de qualité insuffisante pour permettre la pénétration. Concernant les deux patients ayant subi une prostatectomie radicale standard, l'un a réussi à maintenir une érection complète pendant environ 11 heures, tandis que l'autre n'a présenté qu'une tumescence partielle, insuffisante pour un rapport sexuel.

Ces résultats suggèrent qu'une altération du mécanisme vasculaire est probablement responsable de la non-récupération d'une érection complète chez la majorité des patients ayant bénéficié d'une préservation nerveuse lors de la prostatectomie. Cependant, cette étude n'a pas tenté de distinguer les facteurs vasculaires artériels des facteurs veineux, et elle n'a pas précisé la structure exacte à l'origine de cette complication [155].

Cette situation a suscité de nouvelles recherches. Breza et al. ont réalisé une étude sur la vascularisation pelvienne en se basant sur des dissections cadavériques. Parmi les dix cadavres examinés, des artères accessoires ont été identifiées dans sept cas (70%). Dans les quatre cas restants (40%), ces artères accessoires constituaient **une source importante de flux artériel vers les corps**

**caverneux**, tandis que dans un cas particulier, l'artère accessoire représentait **la seule source d'apport artériel érectile** [156].

Rosen et ses collègues ont effectué une angiographie sélective bilatérale de l'artère pudendale interne chez 195 hommes présentant des suspicions d'impuissance d'origine artériogène à travers l'injection ciblée de l'artère pudendale interne, quand cette dernière ne permettait pas de visualiser l'anatomie artérielle pénienne, une injection moins précise était réalisée [157].

Les résultats ont révélé **une variation significative** dans l'origine de l'artère pudendale interne, avec des **artères accessoires identifiées chez 7 % des sujets**. Dans tous ces cas, ces artères accessoires constituaient **la principale source** d'irrigation sanguine de l'artère pénienne [157].

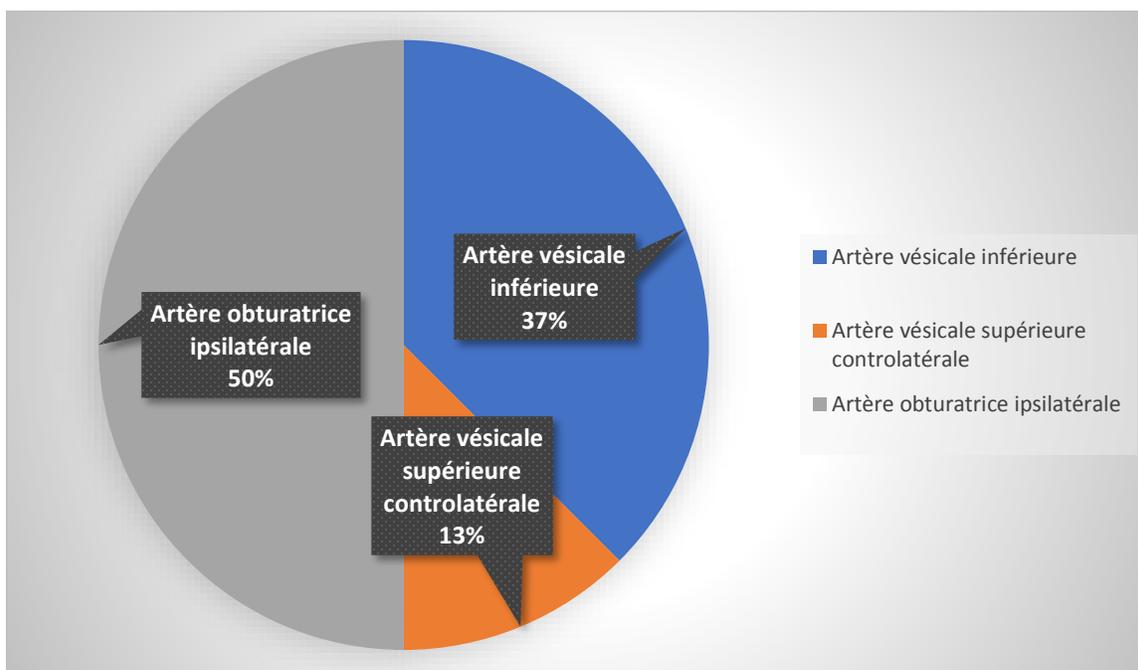
Dans une autre recherche, 12 patients, présentant un âge moyen de 60 ans, ont été évalués en préopératoire. Des examens d'imagerie Doppler couleur réalisés par voie transrectale et périnéale, ainsi qu'une analyse des formes d'ondes spectrales, ont été effectués [158].

Les mesures de la vitesse systolique maximale, de la vitesse diastolique finale, de l'indice de résistance et du diamètre artériel ont été mesurés avant et pendant une érection induite par voie pharmacologique. Les variations hémodynamiques observées lors de l'érection dans les artères pudendales internes et accessoires étaient analogues à celles rapportées dans les artères caverneuses, ce qui souligne le rôle fonctionnel des artères pudendales accessoires dans le processus d'érection pénienne [158].

Ces études soulignent l'importance cruciale de ces artères dans la fonction érectile. Leur préservation est donc primordiale lors des interventions chirurgicales afin de minimiser le risque de dysfonction érectile postopératoire [161].

## 2.2. Origine et Anatomie :

L'artère pudendale accessoire présente une diversité interindividuelle de son origine. Elle est généralement dérivée des artères obturatrices, vésicales et fémorales, entre autres sources [154].



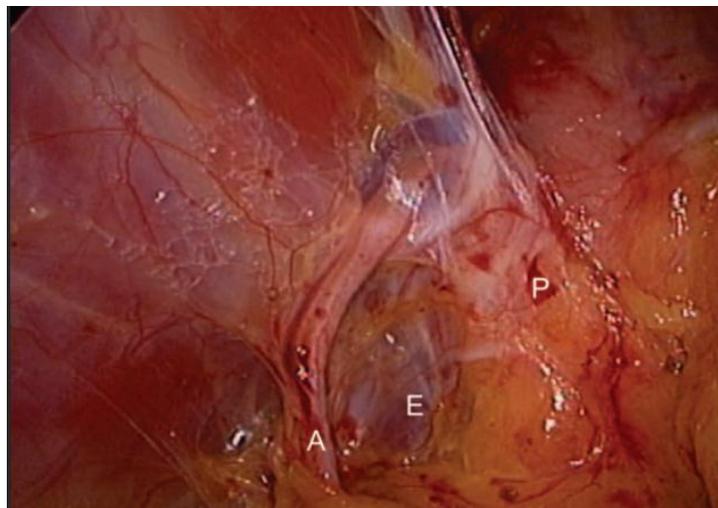
**Graphique 9: Origine des artères pudendales accessoires [154]**

Une description anatomique laparoscopique approfondie des artères pudendales accessoires a été réalisée, examinant leur apparence, leur localisation et leur taux d'identification, basée sur une série de prostatectomies

radicales menées chez 285 patients consécutifs entre octobre 2002 et novembre 2004 [160].

Au total, 92 artères pudendales accessoires (APAs) ont été détectées chez 72 des 285 patients, ce qui correspond à 25% de l'ensemble. Deux variantes distinctes d'APAs ont été observés. Dans 10 % des cas, une APA suivait le contour latéral de la prostate, appelée artère pudendale accessoire latérale, alors que dans 13 % des cas, une APA émergeait à travers les fibres du muscle élévateur de l'anus, près de la région apicale de la prostate, désignée comme artère pudendale accessoire apicale.

Un total de 36 artères prostatiques accessoires (APAs) latérales a été observé chez 29 patients, représentant 10 % de l'échantillon. Ces APA latérales étaient étroitement associées à la surface antérolatérale de la prostate ou au fascia endopelvien. Deux d'entre elles traversaient les fascias endopelvien et



**Figure 53:APA latérale gauche (A) située au-dessus du fascia endopelvien (E) et à quelques millimètres latéralement de la prostate (P).**

périprostatique à la base de la prostate, suivant la surface de la glande sous les fascias, tandis que six autres circulaient au-dessus des fascias avant de les perforer près du tiers distal de la glande. Les 21 APA restantes, en contact avec le fascia endopelvien, se trouvaient à quelques millimètres de la prostate, circulant soit au-dessus (16 cas), soit en dessous du fascia (5 cas).

Au total, sept cas ont montré que les APAs latérales touchaient la surface postérieure de l'os pubien, classées comme étant au-dessus du fascia endopelvien.

Concernant 17 APA latérales, soit 47 %, une branche vers l'apex prostatique a été identifiée, où l'APA longeait la prostate et se dirigeait vers le complexe vasculaire dorsal (CVD). Ce trajet se prolongeait le long de l'aspect latéral des veines du CVD, sous l'arc pubien, en direction du périnée antérieur. Pour les cas avec des artères unilatérales :

- 9 artères (41%) ont été identifiées à droite
- 13 artères (59%) ont été identifiées à gauche

Un total de 46 APAs apicales ont été identifiées chez 38 patients, les artères prostatiques apicales (APAs) se trouvaient en position inférieure et latérale par rapport aux ligaments puboprostatiques. Elles traversaient les fibres du muscle élévateur de l'anus et se rapprochaient tangentiellement de l'apex prostatique. Contrairement aux APAs latérales, leur chemin ne suivait pas le bord latéral de la prostate, mais se prolongeait directement vers l'apex. Ces artères étaient généralement identifiables après l'incision du fascia endopelvien et du muscle élévateur de l'anus au niveau de l'apex. Dans 18 APA apicales, soit 39 %, au moins

une branche collatérale vers l'apex prostatique a été identifiée, avant de poursuivre sa trajectoire vers le côté latéral des veines du complexe vasculaire dorsal (CVD), sous l'arc pubien, en direction du périnée antérieur.

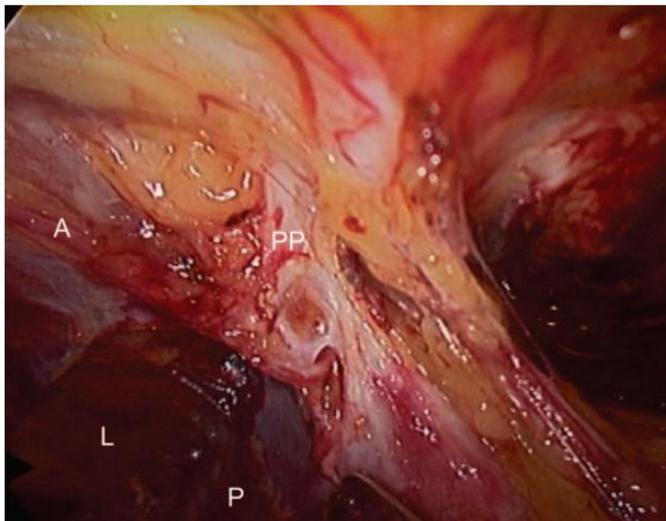


Figure 54:APA apicale gauche (A) émergente à travers les fibres de l'élévateur de l'anus (L), près de l'apex de la prostate (P).

PP : ligament puboprostatique.

Pour les cas avec des APA apicales unilatérales :

- 10 artères ont été identifiées à droite
- 20 artères ont été identifiées à gauche

Les artères pudendales accessoires latérales suivent un trajet caractéristique le long de l'arc tendineux du fascia pelvien. Elles peuvent traverser le muscle élévateur de l'anus pour rejoindre finalement le complexe vasculaire dorsal du pénis. Les artères pudendales apicales, quant à elles, émergent souvent au niveau de l'apex prostatique et apportent une vascularisation directe aux corps caverneux [160].

### **3. Le complexe vasculaire dorsal (plexus de Santorini) :**

Le plexus veineux dorsal, également appelé complexe veineux dorsal ou plexus de Santorini, du nom de l'anatomiste et médecin italien Giovanni Domenico Santorini qui l'a décrit pour la première fois en 1724 [161], est aussi connu sous le nom de plexus vasculaire dorsal en raison de la présence de petites artères provenant de l'artère vésicale inférieure [162].

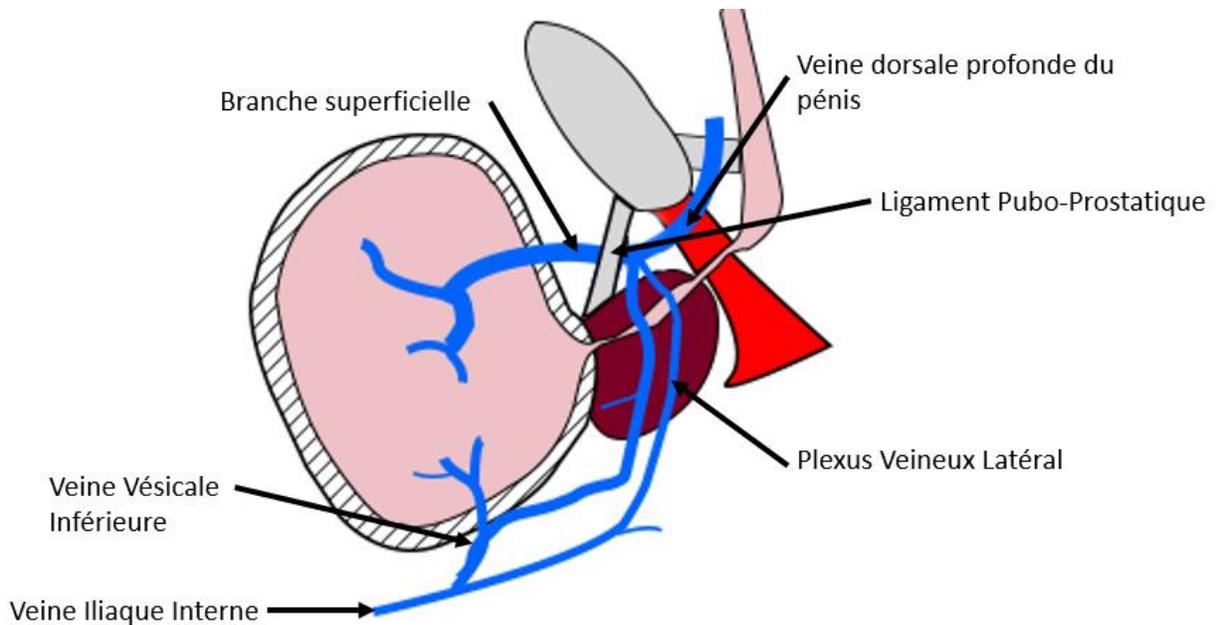
Cette structure majeure située en avant de la prostate et de l'urètre draine le sang des veines péniennes, urétrales et pelviennes latérales. Ce plexus est caractérisé par une multitude d'anastomoses, et toute lésion de ces structures délicates peut provoquer une hémorragie significative, rendant la procédure chirurgicale plus complexe. Cela souligne l'importance d'une compréhension approfondie de cette anatomie avant d'entreprendre toute intervention chirurgicale [163].

Le drainage veineux des tissus érectiles se réalise principalement par des voies supra et infra-lévatoriens, qui se déversent dans les veines vésico-prostatiques latérales ainsi que dans les veines pudendales internes. Grâce à ce système de drainage collatéral, la ligature du plexus veineux dorsal supra-lévatorien n'affecte pas la fonction érectile [164].

En 1949, Beneventi et Noback ont réalisé la première étude anatomique de cette zone, en se concentrant sur l'approche chirurgicale [179]. Ils ont établi que le système veineux à la jonction entre la prostate et l'urètre est constitué d'un ensemble de branches interconnectées provenant de la veine dorsale profonde du pénis. Cette veine émerge du pénis sous le fascia de Buck, se situant entre les

corps caverneux, et pénètre dans le diaphragme urogénital, où elle se divise en trois branches principales :

- Branche superficielle
- Plexus latéral droit
- Plexus latéral gauche



**Figure 55:Le complexe vasculaire dorsal**

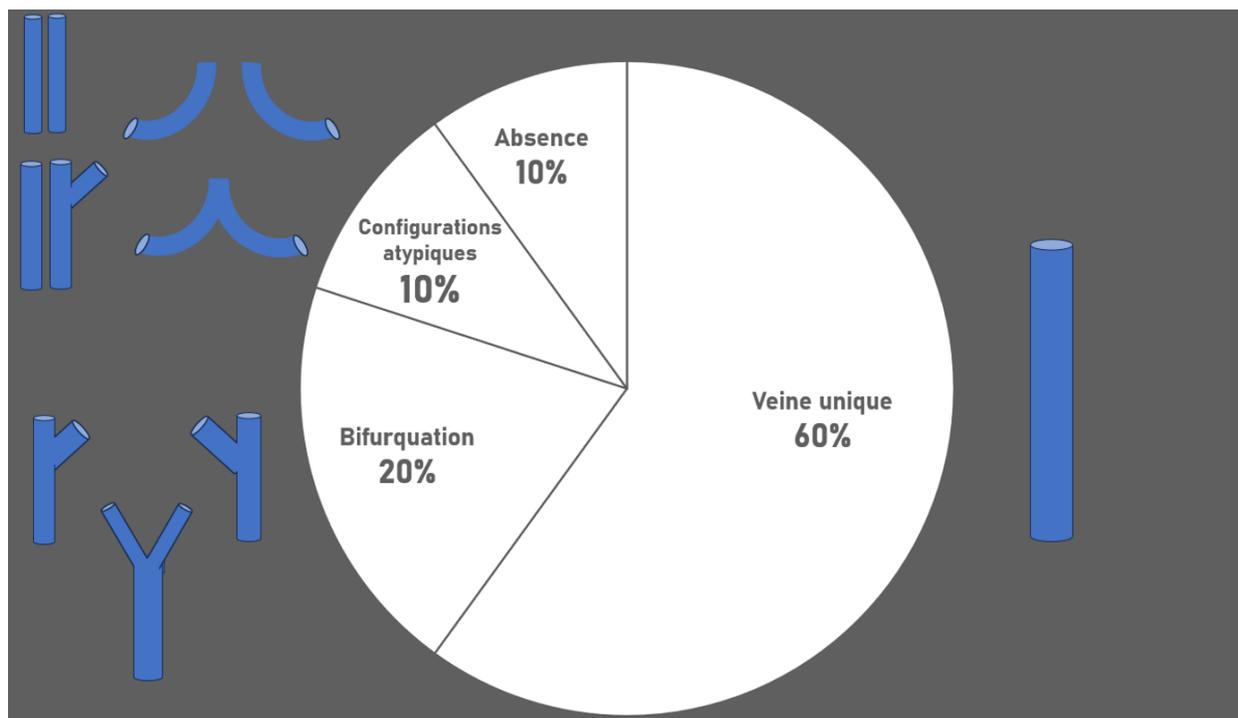
La branche superficielle se trouve au centre, au-dessus du col de la vessie et de la prostate, en passant entre les ligaments pubo-prostatiques. Elle est aisément identifiable au début des interventions rétro-pubiennes et présente des ramifications communicantes avec la vessie ainsi qu'avec le fascia endopelvien. Les plexus latéraux, pour leur part, se dirigent vers l'arrière et vers l'extérieur, établissant des connexions avec les plexus pudendaux, obturateur et vésical.

Le plexus veineux dorsal est intimement lié au fascia endopelvien, qui le recouvre et le sépare de la paroi antérieure de la prostate, il se dirige vers le haut

le long de la surface ventrale de la prostate jusqu'à atteindre la vessie, établissant des anastomoses variables avec les veines de la vésicales et les veines latérales de la prostate. Sur sa face ventrale, ce plexus est recouvert par des prolongements du fascia endopelvien viscéral ainsi que par l'éperon du détrusor.

À la jonction prostatouurétrale, un plan avasculaire s'étend depuis le point où l'éperon détrusorien se détache de la prostate jusqu'à la jonction antérieure avec l'urètre, constituant un repère chirurgical essentiel pour la dissection de ce complexe veineux [102].

Une étude menée par Robert P. Myers a révélé une grande variabilité anatomique des veines du plexus de Santorini. Dans environ 60% des cas, une veine médiane unique était observée. Dans 20 % des cas, cette veine médiane se bifurquait, avec une prédominance de branches vers la paroi pelvienne droite ou gauche. Des configurations vasculaires atypiques ont été observées dans 10 % des cas, tandis que, dans 10 % des cas, les veines superficielles étaient absentes [180].

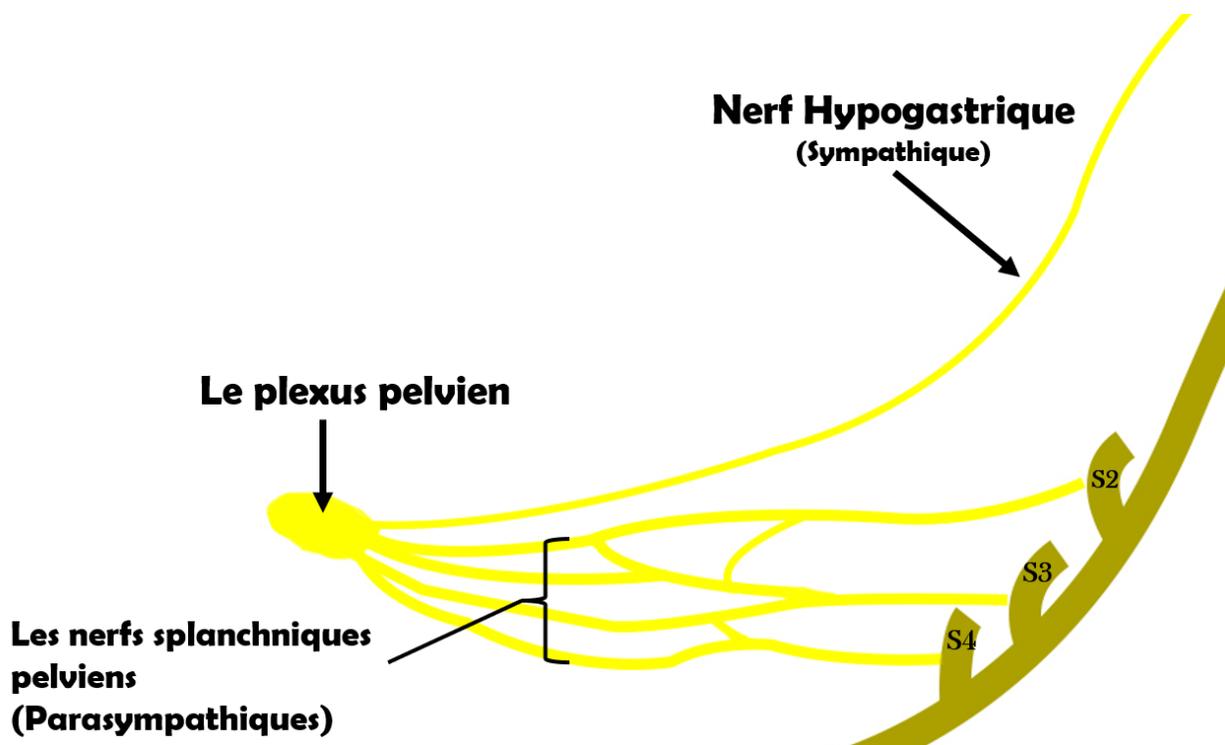


Graphique 10: Les variations anatomiques des veines selon Robert P. Myers

## VII. Structures nerveuses et préservation des fonctions :

### 1. Le plexus pelvien :

Chez l'homme, le plexus pelvien, ou plexus hypogastrique inférieur, est impliqué dans les fonctions d'érection, d'éjaculation ainsi que dans la régulation de la continence urinaire [165], il résulte de la convergence des fibres parasympathiques des nerfs splanchniques pelviens, provenant majoritairement de S4 avec des contributions de S2 et S3, qui se dirigent vers le corps caverneux et sont responsables de la vasodilatation, augmentant ainsi le flux sanguin artériel pendant l'érection [166], ainsi que des fibres sympathiques issues du nerf hypogastrique (T11-L2) [167], responsables majoritairement de l'éjaculation [166].



**Figure 56:origines du plexus pelvien:**

Sa hauteur moyenne est de 4 cm, sa largeur de 1 cm et son épaisseur de 3 mm. Il est constitué de quatre bords et de deux faces. Le bord postérieur reçoit apicalement le nerf hypogastrique et se relie au sacrum au niveau des foramens sacrés antérieurs. L'angle postéro-inférieur est moins clairement délimité et reçoit des afférences des nerfs splanchniques pelviens ainsi que des fibres sympathiques provenant des nerfs splanchniques sacrés. Le bord supérieur est recouvert par le péritoine du cul-de-sac recto-vésical et est en contact avec la face latérale de la base de la vessie. Le bord inférieur est convexe vers le bas et en contact avec le fascia pelvien [165].

Selon les études neuroanatomiques, le plexus pelvien est défini comme un agrégat de cellules ganglionnaires et de fibres nerveuses, qui s'étend de manière bilatérale entre la paroi latérale du pelvis et les organes pelviens. Il présente une

forme rhombique et un diamètre longitudinal compris entre 4 et 5 cm. Ce plexus se trouve entre les vésicules séminales et les uretères transmuraux, sur la face dorsale de la vessie et de la prostate, ainsi que dans le mésorectum en position antéro-latérale [168].

Situé en position rétropéritonéale, il se retrouve dans une plaque fibro-graisseuse de forme rectangulaire et plate. Une couche fasciale de 1 à 2 cm de tissu adipeux para-rectal le sépare de la surface latérale du rectum [165].

Une étude menée par M. Ali et al. a examiné l'anatomie du plexus pelvien chez 6 cadavres et a recherché des repères permettant de détecter facilement cette structure en chirurgie. Les chercheurs ont constamment trouvé le plexus pelvien à un tiers de la distance le long de la ligne tracée entre la jonction recto-sigmoïdienne, situé au niveau de la 3<sup>e</sup> vertèbre sacrée, et la surface postérieure palpable de la symphyse pubienne. La symphyse pubienne est un repère fiable, tandis que la jonction rectosigmoïdienne présente une variabilité plus marquée, avec une longueur moyenne de 2,8 cm, ce qui la transforme d'une "ligne" à une "bande" de la largeur d'un doigt. En pratique chirurgicale, le point de fixation du gros intestin au niveau rétropéritonéal peut servir à identifier la troisième vertèbre sacrée ainsi que le plexus pelvien [169]. L'utilisation de ces repères peut aider à réduire les risques de dommages nerveux lors de procédures comme l'exérèse du mésorectum et la prostatectomie radicale.

Les ramifications du plexus pelvien se divisent en trois projections principales [167] :

- **Antérieure** : Se prolongeant sur la partie latérale de la vésicule séminale et sur la partie inféro-latérale de la vessie.
- **Antéroinférieure** : s'étendant jusqu'à la jonction prostatovésicale et obliquement le long de la surface latérale de la prostate ;
- **Inférieure** : passant entre le rectum et la surface postéro-latérale de la prostate, la projection inférieure du plexus pelvien se combine avec divers vaisseaux pour constituer un faisceau vasculo-nerveux (NVB) bien visible. Ce dernier descend le long du bord postérolatéral de la prostate.

Les fibres nerveuses du plexus pelvien forment une sorte de cage autour de la partie latérale du col de la vessie, de la partie proximale de la prostate et des vésicules séminales, alors que les surfaces antérieures de ces structures contiennent relativement peu de fibres nerveuses [166].

## **2. Faisceau neurovasculaire (NVB) :**

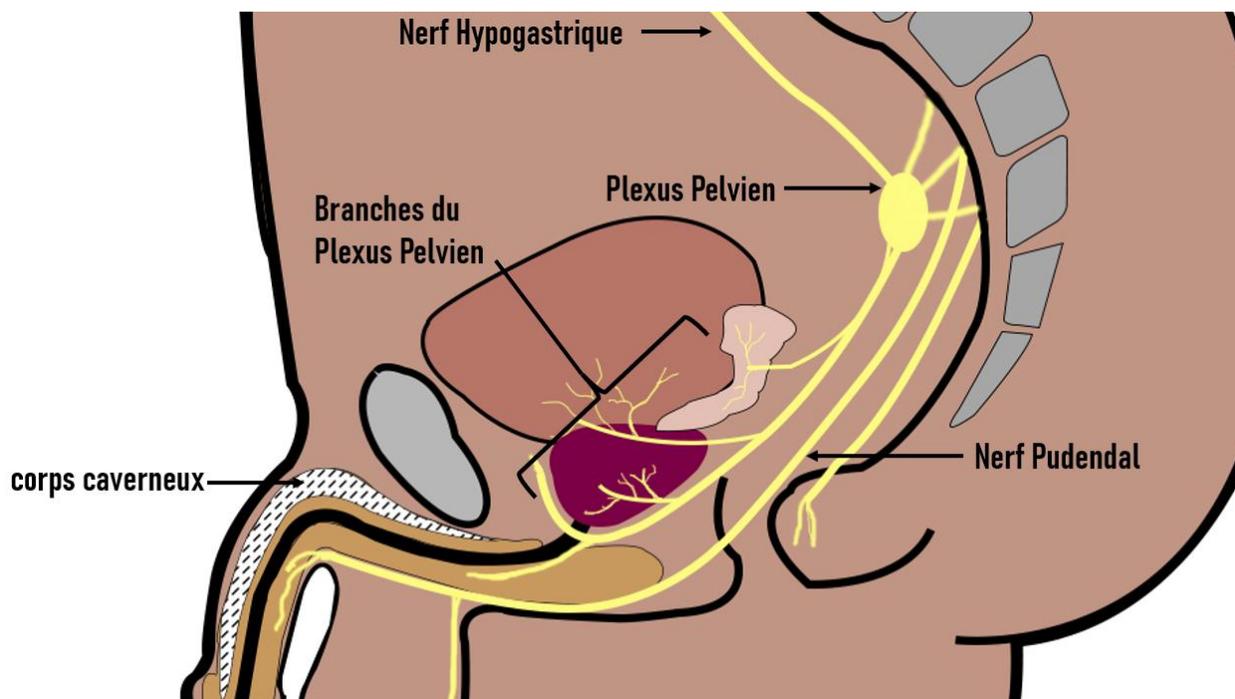
Dans le but d'explorer les origines de l'impuissance chez les hommes ayant subi une prostatectomie radicale, une recherche a été menée par le Dr Walsh, visant à fournir des éléments susceptibles de contribuer à la prévention de cette complication [170].



**Figure 57:Dr Walsh**

Le Dr. Walsh a écarté une origine artérielle en raison de la préservation de l'artère hypogastrique, qui n'a généralement pas ligaturée durant l'opération. De plus, il a été observé que l'interruption du drainage veineux n'affecte pas la fonction sexuelle, bien que la veine dorsale du pénis soit systématiquement ligaturée. Sur la base de ces constatations, le Dr. Walsh en déduit que l'impuissance qui se manifeste après une prostatectomie radicale est d'origine nerveuse, résultant d'une lésion du plexus pelvien responsable de l'innervation autonome des corps caverneux.

L'innervation autonome des corps caverneux chez le fœtus masculin et le nouveau-né a été retracée afin de déterminer la relation topographique entre le plexus nerveux pelvien, la prostate, l'urètre et le diaphragme urogénital.



**Figure 58: Plexus pelvien : origine et branches**

Il a été observé que le plexus pelvien émet des ramifications viscérales qui innervent divers organes tels que la vessie, l'uretère, les vésicules séminales, la prostate, le rectum, l'urètre, ainsi que les corps caverneux et les vaisseaux sanguins de la région pelvienne. Les ramifications qui contiennent des axones moteurs somatiques traversent le plexus pelvien pour innerver le muscle élévateur de l'anus, le muscle coccygien ainsi que la musculature striée de l'urètre. Les branches qui se dirigent vers la prostate se déplacent en dehors de la capsule prostatique et du fascia de Denonvilliers, jusqu'à ce qu'elles perforent la capsule pour entrer dans la prostate, quant aux nerfs dirigés vers l'urètre et

les corps caverneux, ils suivent le même trajet, dorsolatéralement par rapport à la prostate, mais leur étude est difficile en raison de leur petite taille et de leur enveloppement dans un tissu conjonctif fibro-graisseux dense, difficile à disséquer. Étant donné que le nerf pudendal et le nerf dorsal du pénis ne sont pas endommagés, la sensation pénienne et l'orgasme **sont conservés** après une prostatectomie radicale.

Le Dr Walsh a indiqué que les lésions de ces structures se produisent principalement deux manières lors de la prostatectomie :

1. Lors de la dissection du pédicule latéral durant l'extraction de la prostate et des tissus environnants, ce qui peut provoquer des atteintes nerveuses affectant la prostate, l'urètre et les corps caverneux.
2. Lors de la dissection apicale de la prostate, ainsi que lors de la section de l'urètre et des tissus adjacents surtout lors de la prostatectomie radicale par voie périnéale, seuls les nerfs responsables de l'innervation des corps caverneux sont affectés à ce stade [170].

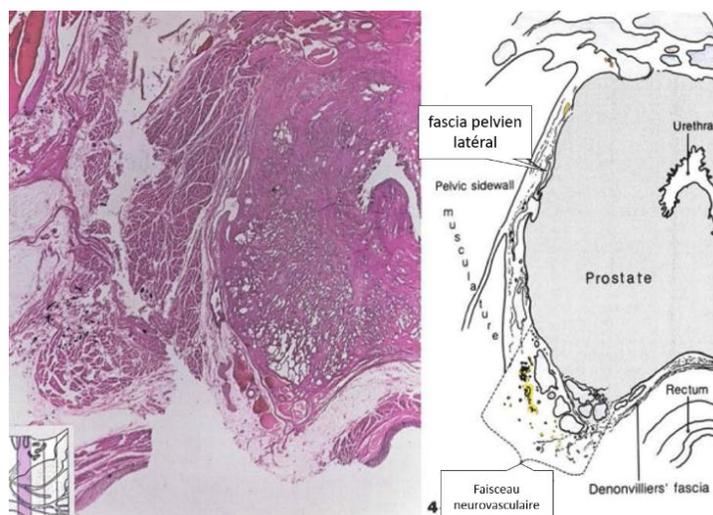
Ces recherches ont conduit le Dr. Walsh à développer en 1983 la première technique de prostatectomie avec préservation des nerfs, dans laquelle il a opté pour que les incisions apicales dans le fascia pelvien latéral soient placées en avant du faisceau neurovasculaire et que le pédicule latéral soit sectionné près de la prostate, révolutionnant ainsi cette intervention [7].

Néanmoins, les relations anatomiques précises de ces nerfs avec la prostate, l'urètre et d'autres structures pelviennes chez les adultes demeurent floues, car les premières investigations anatomiques du plexus pelvien ont été

effectuées sur des nouveau-nés mort-nés, dont les vaisseaux et les fascias environnants avaient été enlevés. Étant donné que ces nerfs sont de taille microscopique et ne peuvent être identifiés que par leur lien avec d'autres structures pelviennes, il a été estimé qu'une compréhension plus approfondie de l'anatomie était indispensable.

Pour cela, une étude a été menée en 1985, avec la participation du Dr. Walsh, au but d'examiner de manière précise la relation entre les branches cavernueuses du plexus pelvien, le fascia pelvien latéral, ainsi que les ramifications des artères et des veines prostatovésiculaires. Pour cela, la vessie, la prostate, l'urètre, le pénis, les corps caverneux, le rectum, ainsi que le fascia et la musculature de la paroi latérale pelvienne ont été prélevés en bloc sur un homme décédé âgé de 60 ans. Le spécimen a été sectionné en tranches transversales de 10  $\mu$ m d'épaisseur, et une tranche sur dix a été colorée à l'hématoxyline et à l'éosine. Par la suite, une reconstruction anatomique en trois dimensions a été effectuée et présentée.

Le faisceau neurovasculaire a été localisé au niveau postérolatéral de l'apex, de la région médiane et de la base de la prostate. Au niveau de l'urètre membraneux, les nerfs présents dans ce plexus se divisent en de multiples nerfs



**Figure 59: Coupe montrant le faisceau neurovasculaire**

microscopiques, discernables sur les côtés postérolatéraux et latéraux de l'urètre membraneux. La densité nerveuse des faisceaux neurovasculaires diminue progressivement le long de la prostate vue que l'innervation autonome de cette dernière est intégrée dans ce faisceau.

Le fascia pelvien latéral fusionne avec la capsule prostatique antérieurement et antéro-latéralement, tout en demeurant deux entités distinctes dans d'autres zones. Les faisceaux neurovasculaires sont systématiquement localisés dans les couches du fascia pelvien latéral, en dehors de la capsule prostatique. À la base, la distance entre la capsule prostatique et

les faisceaux neurovasculaires est de 1,5mm, tandis qu'à l'apex, cette distance atteint 3mm.

Latéralement à l'urètre membraneux, les ramifications nerveuses du faisceau neurovasculaire sont situées à une distance de seulement 7 mm des corps caverneux.

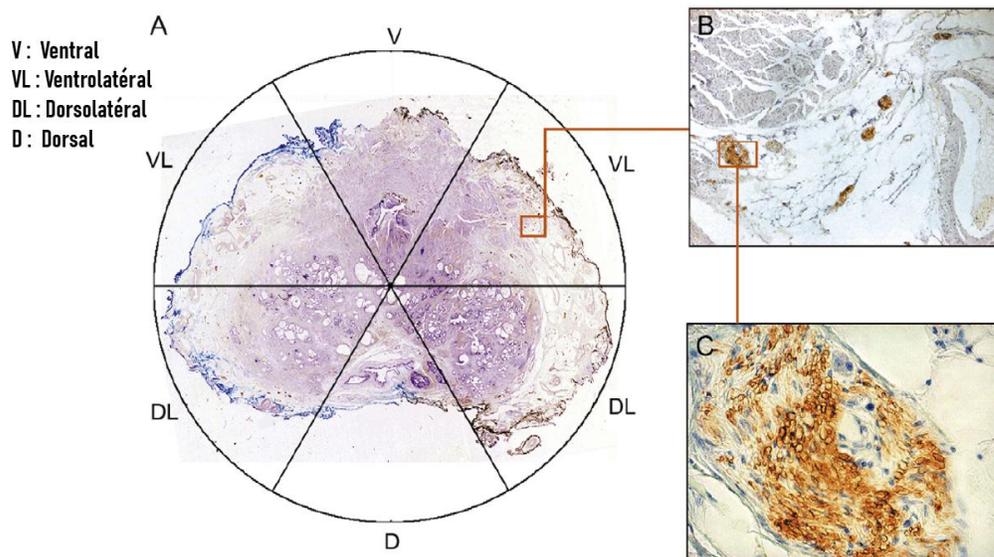
Cette étude présente certaines limites, notamment le fait qu'elle repose essentiellement sur l'analyse d'un seul cas, ce qui ne permet pas d'intégrer les variations anatomiques interindividuelles. De plus, elle ne fait pas de distinction entre les nerfs parasympathiques proérectiles et les nerfs sympathiques [171].

C'est pourquoi de nombreuses études ont tenté d'explorer ces aspects, de manière intéressante, une étude menée par Kiyoshima et al., basée sur l'examen microscopique de 79 échantillons de prostatectomies radicales, a révélé la présence de faisceaux neurovasculaires distincts dans seulement 48 % des cas. Pour les 52 % restants, les nerfs étaient dispersés sur l'ensemble de la surface latérale de la prostate, sans localisation précise ni formation de faisceau, contredisant ainsi les descriptions précédentes de cette structure. Cette observation soulève des interrogations quant à l'innervation exacte du sphincter urétral et des corps caverneux [172].

Une étude immunohistochimique plus récente, réalisée en 2012 par Roman Ganzer et al. a porté sur 228 coupes complètes de 38 prostates avec cinq coupes au niveau de chaque base, milieu et apex, issues de patients ayant bénéficié d'une prostatectomie laparoscopique **sans préservation des nerfs**. Une analyse immunohistochimique a été réalisée, utilisant des anticorps dirigés contre la

tyrosine hydroxylase pour la coloration des fibres nerveuses sympathiques et contre le transporteur vésiculaire de l'acétylcholine (VACHT) pour celle des fibres nerveuses parasympathiques.

L'ensemble des sections a été numérisé puis traité. Pour la quantification nerveuse, des reproductions numériques de toutes les sections entières colorées par immunohistochimie ont été superposées au centre d'une grille, divisant chaque section en six secteurs numérotés dans le sens des aiguilles d'une montre.



(A) Coupe en montage complet, milieu de la prostate (B) Grossissement de dix fois d'un nerf sympathique dans la région ventrolatérale. (C) Grossissement de quarante fois du nerf en (B) montrant les vésicules synaptiques.

### Figure 60: Coupe en montage complet de la prostate

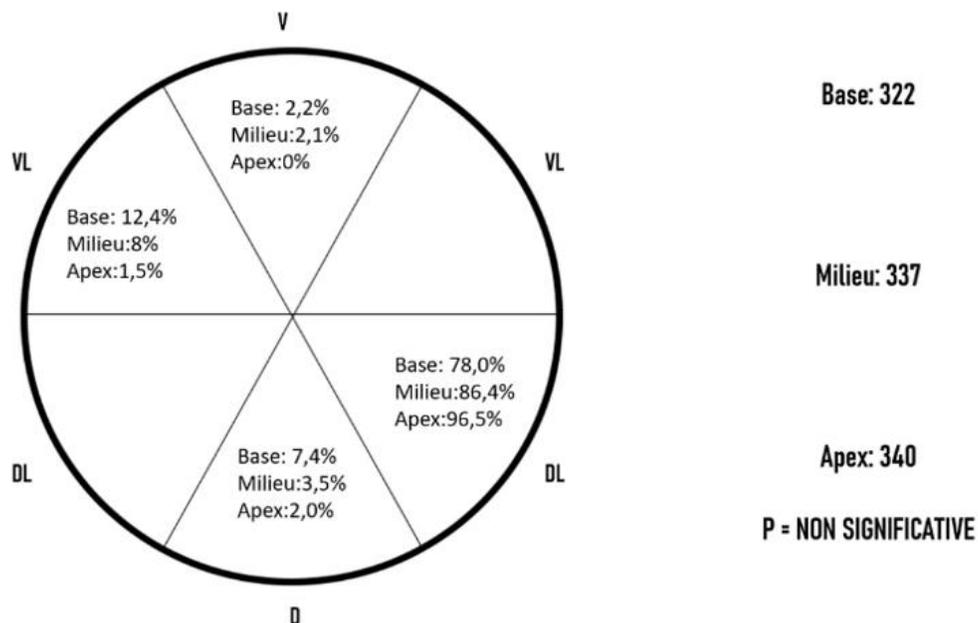
Ensuite, deux enquêteurs ont procédé à une quantification des nerfs périprostatiques dans plusieurs régions, en faisant la distinction entre les nerfs parasympathiques et sympathiques. Les calculs ont été effectués en utilisant des valeurs moyennes tirées des résultats de deux sections contiguës.

Au total, 2530 fibres nerveuses ont été dénombrées dont :

- 999 fibres nerveuses parasympathiques.
- 1531 fibres nerveuses sympathiques.

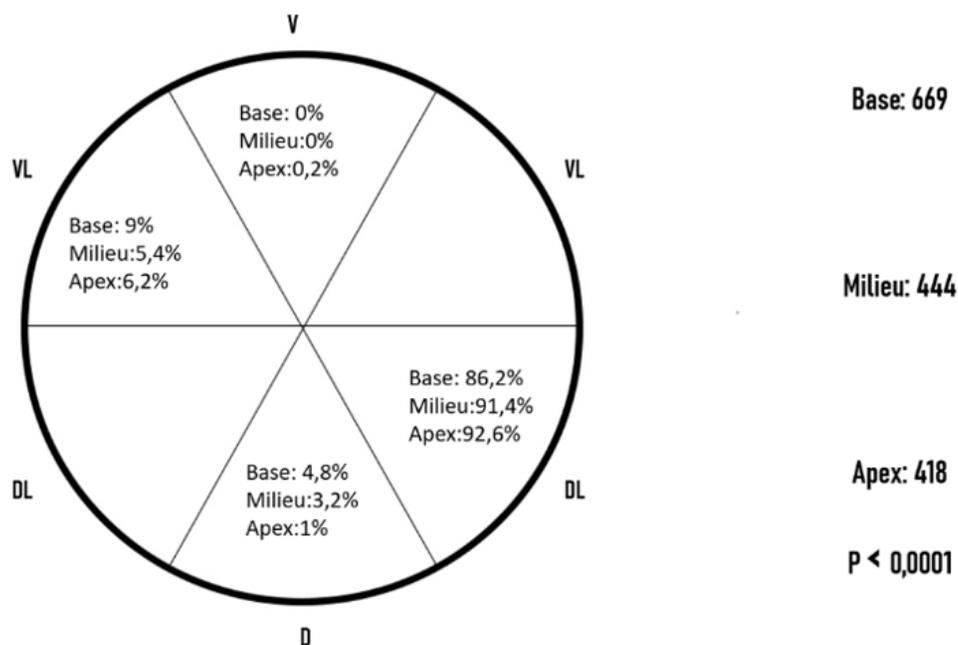
La majorité de ces fibres nerveuses a été localisée dans les zones dorsolatérales.

L'analyse de la répartition des nerfs parasympathiques met en lumière des variations intéressantes entre la base et l'apex. Bien que le nombre total de nerfs reste constant, leur localisation varie de manière significative. À la base, on observe une dispersion des fibres nerveuses parasympathiques, avec 78% d'entre elles en position dorsolatérale et 14,6% au-dessus de la ligne horizontale. À l'apex, en revanche, 96,5% des nerfs parasympathiques se trouvent en position dorsolatérale, tandis que ceux en position ventrolatérale sont presque absents, ne représentant que 1,5%.



**Figure 61: La distribution des nerfs parasympathiques selon Ganzer et al.**

À l'inverse des nerfs parasymphatiques, le nombre total de nerfs sympathiques diminue de manière statistiquement significative entre la base et l'apex. Cette diminution pourrait s'expliquer par une distribution des nerfs adaptée à l'innervation de la prostate et des structures environnantes. La majorité des nerfs sympathiques se localise en position dorsolatérale, tandis que la proportion de nerfs ventrolatéraux demeure relativement stable.



**Figure 62: La distribution des nerfs sympathiques selon Ganzer et al.**

Malgré la présence avérée de nerfs prostatiques ventrolatéraux, cette étude indique que seule une minorité d'entre eux semble posséder une qualité parasymphatique pro-érectile [173]. Malgré cela, de nombreuses études ont mis en évidence que la libération antérieure haute, technique visant à préserver les fibres nerveuses antérieures, a entraîné une amélioration de la fonction érectile et de la continence urinaire, par rapport aux patients n'ayant pas reçu cette intervention [174].

Les techniques de préservation des nerfs peuvent être influencées par la direction de la dissection des bandelettes, qui peut être antégrade, comme dans les interventions cœlioscopiques, rétrograde, comme dans les approches rétro-pubiennes ou périnéales, ou encore mixte, comme observé dans certaines techniques rétro-pubiennes. Plusieurs chirurgiens ont décrit des variantes, incluant l'isolement des nerfs caverneux à l'apex prostatique suivi d'une dissection rétrograde, ou l'accès aux nerfs caverneux sur les bords latéraux de la prostate avec une dissection à la fois antégrade et rétrograde. Une autre méthode consiste à accéder aux nerfs caverneux à la base de la prostate, puis à les séparer des bandelettes neuro-vasculaires le long du bord latéral jusqu'à l'apex prostatique [175].

La préservation du faisceau neurovasculaire (NVB) chez les patients atteints de cancer de la prostate (CaP) à haut risque ou localement avancé n'a pas été associée à une altération significative du contrôle local de la maladie [176]. La ligature de ces branches artérielles et veineuses qui accompagnent ce faisceau dans leur partie médiane peut endommager les nerfs innervant la prostate, l'urètre et les corps caverneux [177].

Dans une étude récente, Reeves et al. ont évalué 13 749 cas de prostatectomies radicales (RP) issus de 27 recherches, et ont constaté que la préservation nerveuse favorise une amélioration de la continence au cours des six premiers mois post-opératoires [178].

La découverte des faisceaux neurovasculaires a révolutionné la chirurgie de la prostate, permettant la préservation nerveuse systématique et améliorant

ainsi significativement la qualité de vie post-opératoire en limitant les troubles de l'érection.

# TECHNIQUES CHIRURGICALES

## I. La prostatectomie périnéale

### 1. Développement de la prostatectomie périnéale :

#### 1.1. La technique de Young :

La prostatectomie périnéale radicale a été introduite pour la première fois en 1904 à l'hôpital Johns Hopkins par le Dr Hugh Hampton Young (Figure 63), souvent reconnu comme le pionnier de l'urologie moderne [186].



Figure 63:Dr Hugh Hampton Young

Cette procédure a été décrite chez un patient âgé de 70 ans, souffrant de troubles urinaires fréquents et douloureux depuis un an. Lors de l'examen, la prostate se révélait ferme, légèrement nodulaire, avec une induration s'étendant

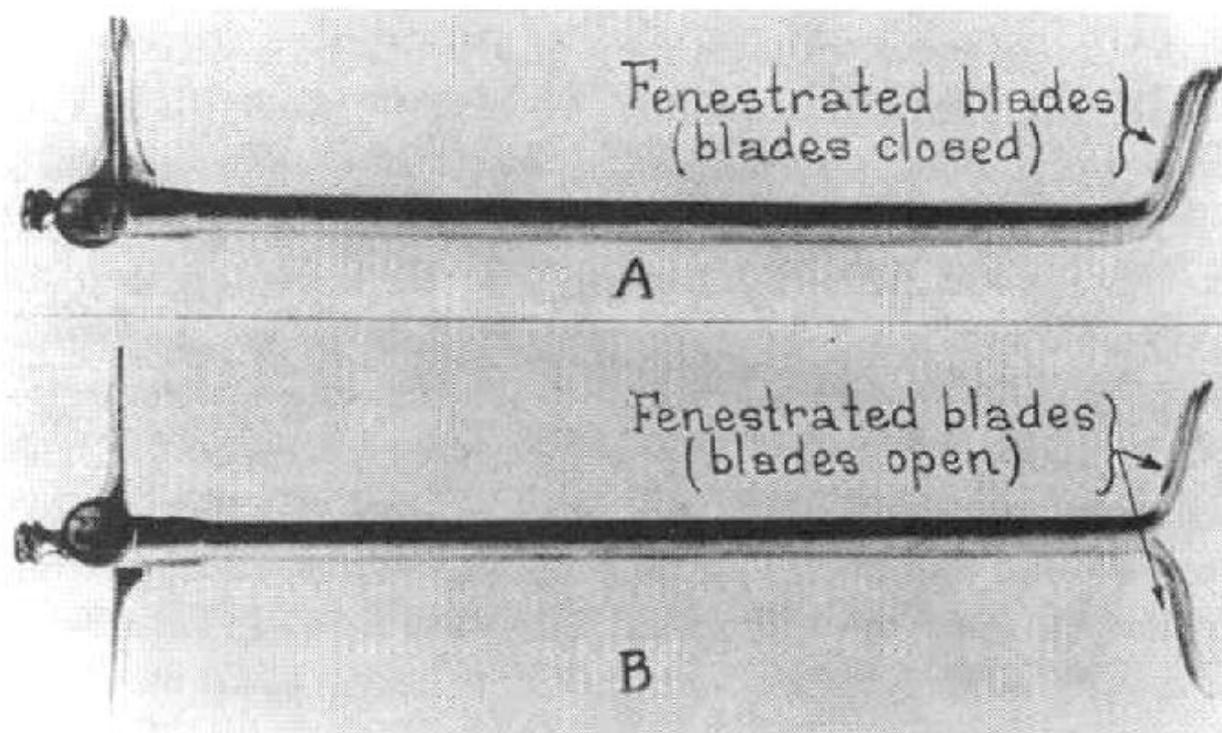
vers la zone de la vésicule séminale gauche. La cystoscopie n'a montré qu'une légère hypertrophie prostatique intravésicale.

Le patient a donné son consentement pour une opération radicale, au cours de laquelle l'ensemble de la prostate, ainsi que l'urètre, la capsule, une portion adjacente de la vessie, incluant une grande partie du trigone et les vésicules séminales, a été excisé en un seul bloc.

L'opération s'est déroulée avec l'assistance du docteur William Stewart Halsted comme suivant :

Dr Young débute l'intervention par une **incision cutanée en V inversé** au niveau du périnée, chaque branche de l'incision mesurant environ cinq centimètres. Une dissection émoussée permet de révéler le bulbe pénien ainsi que le tendon central, qui est ensuite sectionné pour donner accès au muscle recto-urétral. La coupe de ce muscle facilite l'accès direct à l'urètre membraneux, situé derrière le ligament triangulaire.

L'**urétrotomie** est effectuée à l'aide d'un guide rainuré, suivi de l'introduction d'un tracteur prostatique qui est ensuite ouvert une fois qu'il atteint la vessie afin de le stabiliser. En tirant sur cet instrument, le chirurgien effectue une dissection émoussée entre le rectum et la capsule prostatique, ce qui permet de révéler la totalité de la surface postérieure de la prostate. Dr Young a observé que cette région montre saignements plus importants et des adhérences plus prononcées par rapport à une prostatectomie bénigne.



**Figure 64: Le rétracteur de Young**

L'évaluation de la prostate met en évidence une induration notable, dépassant celle habituellement rencontrée dans les hypertrophies bénignes. Malgré l'absence d'envahissement des tissus périprostatiques et du rectum, il a été décidé de procéder à une **excision complète**.

Le manche du rétracteur est abaissé pour exposer l'**urètre membraneux**, qui est ensuite sectionné de manière transversale à l'aide d'un scalpel, laissant un court moignon urétral au niveau du ligament triangulaire. Une pression supplémentaire sur le tracteur permet d'exposer et de sectionner le **ligament puboprostatique** à l'aide de ciseaux, libérant ainsi la prostate de ses principales attaches. Les fixations latérales, qui présentent une résistance relativement faible, peuvent être facilement détachées à l'aide du doigt.

Lors de la dissection, une hémorragie modérée a été constatée, émanant principalement des veines prostatiques situées derrière le ligament triangulaire. Le saignement est maîtrisé par le **clampage des points de saignement** et l'application de compresses pour exercer une pression.

La dissection émoussée permet de libérer la surface postérieure des vésicules séminales, tout en veillant à préserver le fascia de Denonvilliers, considéré par le Dr Young comme une barrière cruciale pour restreindre l'avancée postérieure du cancer. Par la suite, la partie antérieure de la vessie est exposée en abaissant le rétracteur, permettant une **incision de la paroi vésicale** à environ 1 cm de la jonction prostatovésicale.

Le fond de la vessie est élevé à l'aide du manche du scalpel, exposant ainsi les **vésicules séminales** et les **canaux déférents** qui sont libérés par dissection émoussée. Après traction des **canaux déférents**, ceux-ci sont sectionnés aussi haut que possible. À ce stade, l'intégralité de la prostate, des vésicules séminales, des canaux déférents ainsi qu'une partie de la vessie sont retirés en un seul bloc

L'exérèse a permis de retirer :

- L'urètre **membraneux**
- La **prostate avec sa capsule intacte**
- Les **vésicules séminales**
- **4 cm des canaux déférents**
- Une bande de tissu vésical, large de 1 cm le long des surfaces antérieure et latérale et de 2 cm dans la région du trigone

**Reconstruction et anastomose :**

Un **cathéter souple** a été utilisé pour repérer l'**urètre membraneux**. Le bord antérieur de l'ouverture vésicale est ensuite abaissé vers l'**urètre membraneux** grâce à un **forceps** pour permettre une **anastomose**, le Dr Young a été surpris de constater la facilité avec laquelle il pouvait être tiré vers le bas jusqu'à l'urètre membraneux. Ensuite il place les **sutures de manière minutieuse**, dont la première a été réalisée en introduisant l'aiguille dans le ligament triangulaire au-dessus de l'urètre, puis en la faisant ressortir par la paroi antérieure de l'urètre membraneux, puis à travers la paroi antérieure de la vessie dans la ligne médiane, de l'intérieur vers l'extérieur, en veillant à n'inclure que la sous-muqueuse et le muscle. Une fois la suture nouée, la paroi antérieure de la vessie a été rapprochée de la ligne médiane du toit de l'urètre membraneux. Les sutures latérales, associées à deux sutures postérieures réalisées de manière analogue, ont permis de compléter l'anastomose entre l'urètre membraneux et un petit anneau constitué par le nouage des sutures, ce qui a modelé la partie antérieure du bord de la plaie vésicale. Le reste de la plaie vésicale apparaissait désormais sous la forme d'une fente longitudinale facilement suturable.

Après l'anastomose uréthro-vésicale, les **muscles élévateurs de l'an**us sont rapprochés à l'aide de sutures en fil en boyau de chat résorbable, et la plaie cutanée est fermée, laissant une petite ouverture pour permettre un **drainage par des gazes**. Le cathéter est fixé en place et le patient est ramené en salle.

L'examen histologique a révélé un adénocarcinome prostatique infiltrant l'ensemble de la glande et s'étendant aux tissus périprostatiques. La capsule

prostatique et le dôme vésical étaient indemnes. Cependant, une extension tumorale le long du canal déférent gauche a été observée jusqu'à la limite supérieure de l'exérèse chirurgicale, située à 4 cm au-dessus de la base de la prostate.

Le patient a bénéficié d'une récupération initiale satisfaisante, avec une reprise de la miction spontanée malgré une incontinence urinaire diurne. Cependant, dans les mois suivant sa sortie, l'apparition de douleurs urétrales a conduit à la découverte de calculs vésicaux. Lors de la litholapaxie, un calcul a été retrouvé fixé à une ligature, ce qui a entraîné une perforation vésicale lors de son extraction. Cette complication a provoqué la formation d'un abcès périnéal et une fistule urinaire, ayant finalement conduit au décès du patient.

L'autopsie a révélé une cicatrisation satisfaisante entre la vessie et l'urètre, ainsi que la présence de résidus tumoraux derrière la vessie, le long du canal déférent gauche [187].

### 1.2. La technique de Belt :

La prostatectomie radicale par voie périnéale a connu de nombreuses améliorations depuis l'implémentation de la technique de Young. Parmi celles-ci, la contribution la plus marquante a été apportée par **le docteur Elmer Belt** (Figure 65) en 1942, qui a proposé diverses modifications visant à améliorer l'efficacité de l'intervention tout en minimisant les risques de complications post-opératoires.

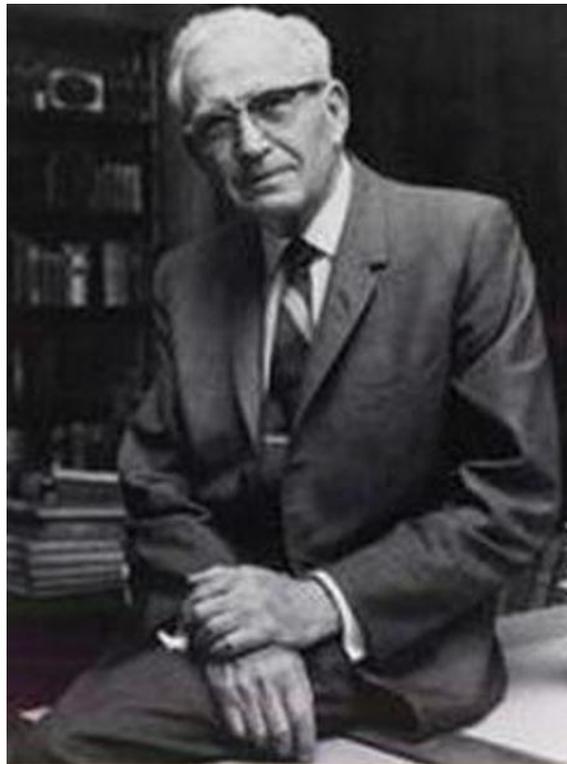
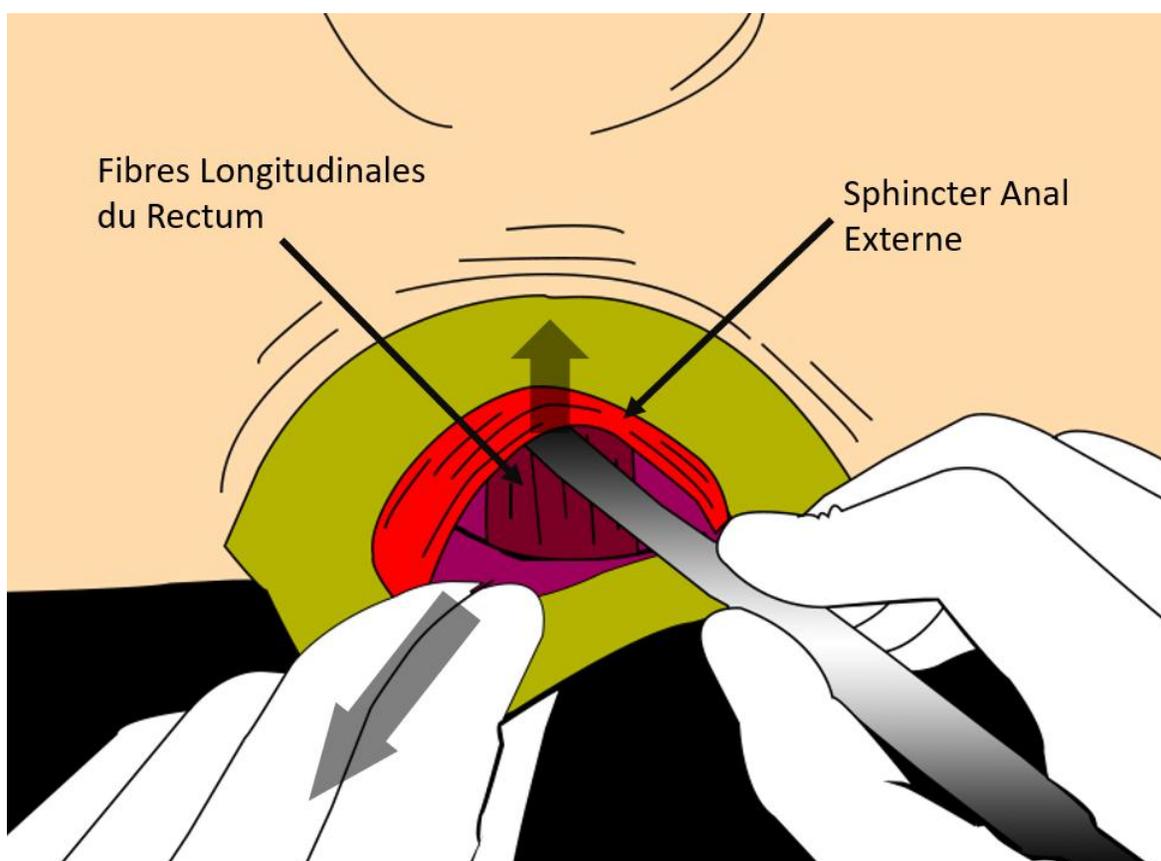


Figure 65:Dr. Elmer Belt

Dr. Belt a identifié une structure anatomique naturelle se trouvant entre les fibres longitudinales du rectum et le sphincter anal externe. En utilisant cette voie sous-sphinctérienne, il était capable d'accéder à la prostate sans avoir à sectionner les muscles ou les nerfs, minimisant ainsi les pertes sanguines et les

dégâts aux nerfs qui contrôlent à la fois la continence urinaire et la fonction érectile.

Une des améliorations majeures apportées par le Dr. Belt réside dans la préservation du sphincter externe. Contrairement à la méthode de Young, où les fibres circulaires du sphincter anal externe étaient généralement sectionnées, la technique du Dr Belt opte plutôt pour les rétracter vers le haut (Figure 66). Belt avait pour objectif de réduire le risque d'incontinence postopératoire, une complication courante, en limitant les dommages à la musculature du plancher pelvien



**Figure 66: technique de Belt**

Le Dr Belt a aussi recommandé l'incision de la couche antérieure du fascia de Denonvilliers lors de la dissection, et de conserver l'apex de la prostate pour optimiser le contrôle urinaire, plutôt que de procéder à son ablation totale. Étant donné que l'apex est intimement associé à l'urètre, sa préservation contribue à maintenir une proportion significative du mécanisme sphinctérien urinaire, facilitant ainsi une meilleure gestion de la fonction vésicale chez les patients post-opératoires [188].

Le Dr. Young s'opposait néanmoins à ces deux derniers changements, considérant qu'ils compromettaient les principes fondamentaux de la chirurgie oncologique en augmentant la probabilité de laisser des cellules cancéreuses [188].

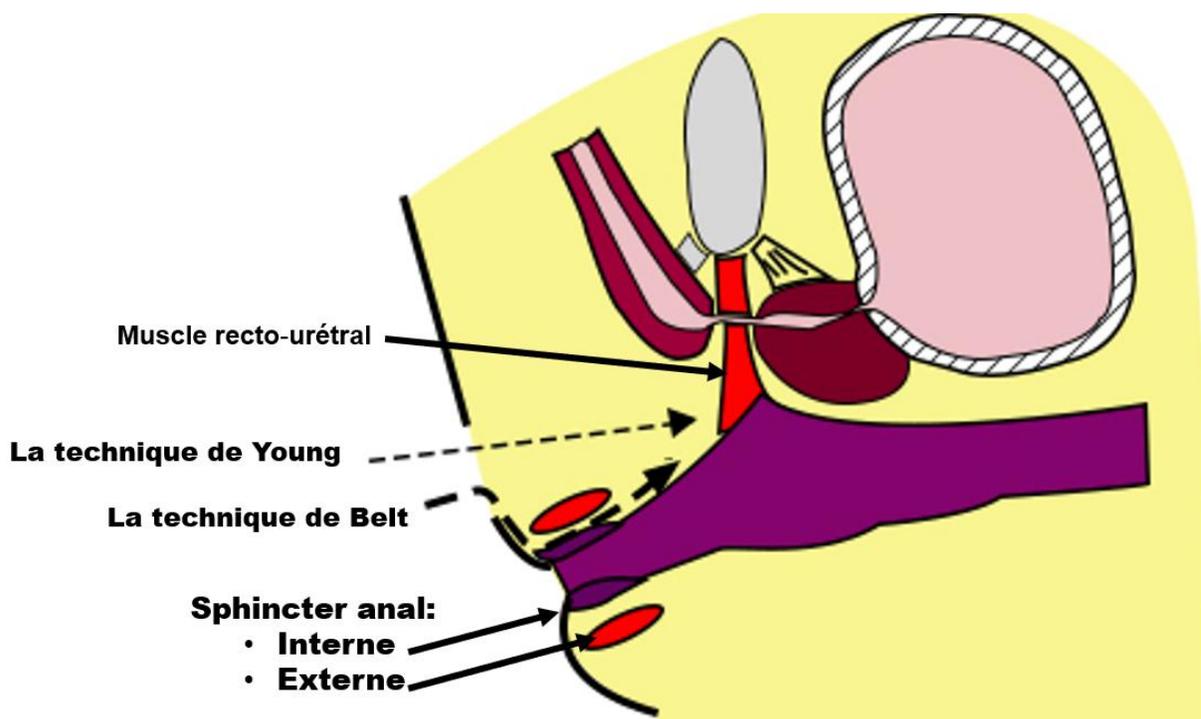


Figure 67:Les voies d'abord des techniques de Young et de Belt.

### **1.3. L'introduction de la technique de préservation nerveuse dans la prostatectomie par voie périnéale :**

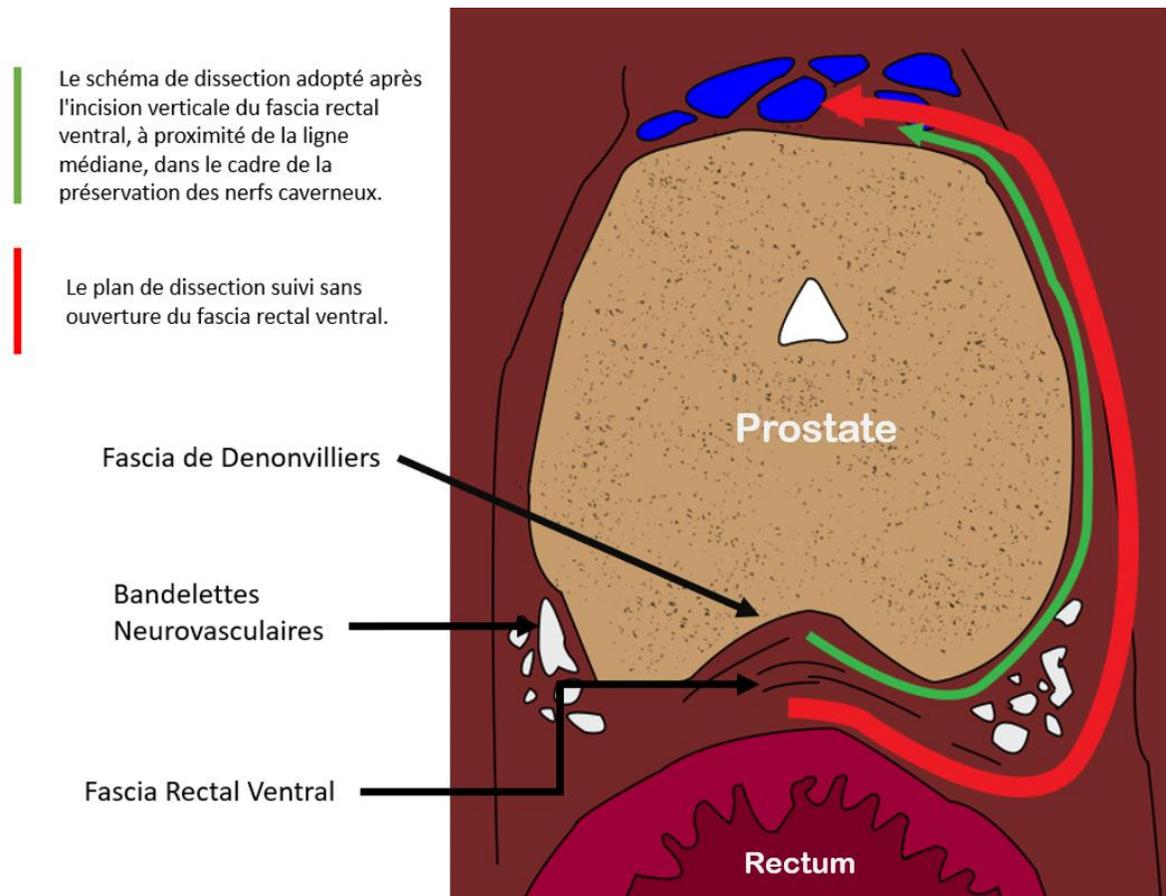
La voie périnéale a été progressivement délaissée au profit de la radiothérapie et de la voie rétro-pubienne, considérées comme des alternatives moins invasives et associées à une moindre morbidité pour le traitement du cancer de la prostate [190].

Les travaux de Reiner et Walsh, en 1979, ont marqué un tournant dans la chirurgie de la prostate. Leur technique de ligature précoce et méticuleuse de la veine dorsale lors de l'abord rétro-pubien a significativement diminué les pertes sanguines peropératoires, améliorant ainsi la sécurité de l'intervention. C'est également Walsh qui, après des dissections anatomiques approfondies, a décrit pour la première fois la technique de prostatectomie radicale rétro-pubienne avec préservation des nerfs [7].

Cette innovation a encouragé une large adoption de cette méthode dans la prise en charge du cancer de la prostate et a également joué un rôle significatif dans le déclin de l'approche périnéale.

Ce n'est qu'en 1988 que les docteurs Vernon E. Weldon et Frank R. Tavel ont réussi à démontrer que la préservation des nerfs était réalisable par voie périnéale [187], après avoir apporté des ajustements précis à la dissection fasciale. La technique traditionnelle consistait en une dissection extensive autour de la prostate (Figure 68), entraînant fréquemment des lésions des nerfs érectiles. Weldon et Tavel ont révolutionné cette approche en s'appuyant sur une connaissance approfondie de l'anatomie neurovasculaire pelvienne. Ils ont ainsi

modifié le plan de dissection, en remplaçant l'incision transversale classique du fascia de Denonvilliers par une incision verticale paramédiane, préservant ainsi les plexus nerveux et améliorant la fonction érectile postopératoire [187].



**Figure 68: la technique de préservation nerveuse dans la prostatectomie par voie périnéale**

Cette approche permet de contourner les nerfs caverneux situés sur les côtés, ce qui diminue le risque de lésions nerveuses. De plus, ils ont effectué une dissection plus précise et soignée de l'urètre membraneux afin de préserver les nerfs adjacents, en évitant une extension latérale excessive lors de la section des pédicules vasculaires.

La prostatectomie radicale par voie périnéale, modifiée par Vernon E. Weldon et Frank R. Tavel, offre plusieurs avantages significatifs par rapport à l'approche rétro-pubienne. Cette méthode permet de diminuer de manière significative les pertes sanguines en contournant le plexus veineux de Santorini, tout en réduisant la morbidité post-opératoire. L'accès direct à la jonction vésico-urétrale facilite une anastomose plus précise, ce qui diminue les risques de sténose et d'incontinence. En outre, cette technique est associée à un faible taux de complications graves, telles que les lésions rectales ou les rétrécissements anastomotiques, et favorise une meilleure récupération de la continence urinaire.[187]

## **2. Avantages, Limites et Indications :**

La PRP est une technique chirurgicale qui offre des résultats satisfaisants en termes de contrôle du cancer, de continence urinaire et de faible taux de complications. Cependant, elle présente des limites, notamment:

- **Récupération de la fonction érectile :** Inférieure aux techniques modernes comme la prostatectomie robotique ou laparoscopique.
- **Taux de marges chirurgicales positives :** Plus élevé que certaines techniques alternatives.

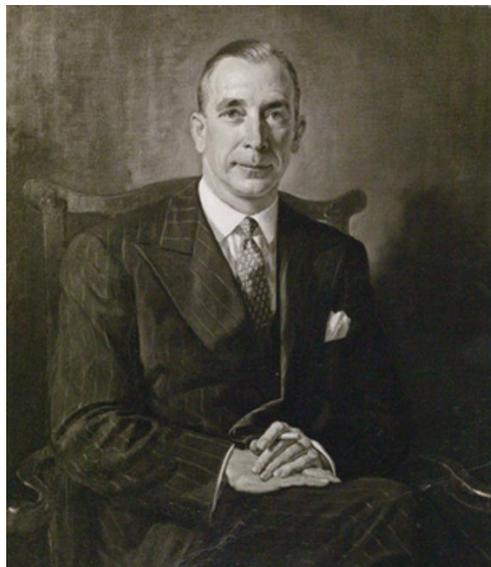
Malgré ces limites, la PRP reste une option utile dans des contextes où les ressources pour des techniques plus avancées (robotique ou laparoscopie) sont limitées. Elle est économique, techniquement réalisable et adaptée aux patients ayant un IMC élevé ou des antécédents de chirurgie pelvienne.

En conclusion, bien que la PRP ne soit plus la méthode de choix dans les pays disposant de technologies modernes, elle ne peut pas être considérée comme totalement obsolète. Elle reste pertinente dans des contextes spécifiques et pour des patients sélectionnés [191].

## **II. La prostatectomie rétropubienne :**

### **1. Développement de la prostatectomie rétropubienne :**

En 1945, le Dr Terence Millin (Figure 69), qui exerçait en tant que chirurgien à l'hôpital All Saints et à l'hôpital Royal Masonic de Londres, transforma le traitement du cancer de la prostate en mettant en œuvre la technique rétro-pubienne. Cette innovation constitua une étape majeure dans l'évolution de la prostatectomie radicale [192].



**Figure 69:Dr Terence Millin**

Ses recherches, fondées sur l'analyse de 20 cas cliniques dans son ouvrage consacré à la chirurgie rétro-pubienne, notamment dans le chapitre sur le carcinome de la prostate, Dr. Millin justifie son innovation en réponse aux

nombreuses complications et limitations des techniques chirurgicales conventionnelles [193]. Face aux contraintes des techniques chirurgicales existantes, le Dr. Millin a innové en concevant une approche extra-vésicale de la prostatectomie. Ses dissections cadavériques lui ont permis de démontrer la faisabilité d'une voie d'abord rétro-pubienne après section des ligaments suspenseurs du pénis et pubo-prostatiques.

Cette méthode, en évitant l'incision de la vessie, réduisait les risques de complications post-opératoires, telles que les fuites urinaires et les infections, tout en diminuant de manière significative la durée de l'intervention chirurgicale et les pertes sanguines. De plus, elle offrait une solution aux principaux inconvénients associés à l'approche périnéale, notamment l'incontinence et les fistules, souvent redoutées [194].

Bien que la prostatectomie radicale ait longtemps été considérée comme un traitement efficace du cancer de la prostate, son adoption a été limitée par des effets secondaires notables. De nombreux patients ont signalé une dysfonction érectile et une incontinence urinaire post-opératoires, tandis que la voie d'abord rétro-pubienne était associée à un risque hémorragique accru. L'émergence de la radiothérapie comme alternative thérapeutique, associée à une meilleure compréhension des mécanismes tumoraux, a progressivement réduit le recours à la chirurgie radicale.

L'observation en 1977 par Dr. Walsh d'un patient de 58 ans à Philadelphie, ayant conservé sa fonction érectile après une prostatectomie totale, a remis en

cause la croyance établie en urologie selon laquelle les nerfs caverneux traversaient nécessairement la prostate.

À travers une série d'études anatomiques, le Dr. Walsh a entrepris d'explorer les origines des complications post-opératoires associées à la prostatectomie radical [195], ses travaux ont révélé que l'impuissance post-prostatectomie radicale était principalement due à des lésions du plexus nerveux pelvien, survenant notamment lors de la dissection apicale, de la section urétrale et de la division des pédicules latéraux, tandis que l'incontinence était souvent observée en raison d'une compréhension incomplète de l'anatomie du complexe sphinctérien. Enfin, des saignements excessifs se produisaient en raison d'un déficit de connaissances précises concernant l'anatomie du complexe veineux dorsal et du plexus de Santorini [170].

Ce manque de connaissances concernant l'anatomie périprostatique s'expliquait en partie par l'utilisation traditionnelle de cadavres adultes, dont les tissus fixés rendaient la dissection difficile. Les viscères pelviens, compressés, compliquaient encore l'analyse anatomique. Le Dr. Walsh a innové en réalisant des dissections peropératoires et en utilisant des cadavres d'enfants, mieux adaptés à l'étude de cette région anatomique complexe.

À la fin des années 1970 et dans les années 1980 Patrick Walsh a été un pionnier de la prostatectomie radicale rétropubienne anatomique, une technique innovante qui permettait de préserver la fonction érectile en épargnant les faisceaux neurovasculaires, rendant ainsi la prostatectomie radicale

retropubienne la technique de référence dans le traitement du cancer de la prostate [195,196].

En 1985, Walsh a publié les résultats d'une étude portant sur 100 patients ayant bénéficié d'une technique de préservation nerveuse. À l'exception de 7 cas de tumeurs plus avancées (pT3), toutes les marges chirurgicales étaient saines. La continence urinaire a été préservée chez tous les patients, et 84% des hommes ayant une fonction érectile préopératoire l'ont conservée [197].

## **2. Technique de prostatectomie radicale rétropubienne ouverte avec préservation intrafasciale des nerfs :**

La prostatectomie radicale rétropubienne avec préservation intrafasciale des nerfs (nsRP) est une technique chirurgicale avancée permettant de traiter le cancer de la prostate localisé en combinant une exérèse tumorale complète et une préservation optimale des fonctions urinaires et sexuelles. Cette approche repose sur une dissection minutieuse et à une préservation des structures neurovasculaires, tout en assurant un contrôle oncologique rigoureux en réduisant les marges chirurgicales positives.

Une anesthésie combinée rachidienne et générale est recommandée. Le remplacement des liquides intraveineux est limité à 500 ml jusqu'à l'ablation de la prostate

L'intervention commence par une incision médiane infra-ombilicale d'environ 8 à 10 cm, permettant d'accéder à l'espace rétropubien. Le fascia endopelvien est incisé, et les muscles élévateurs de l'anus sont écartés pour exposer les structures sous-jacentes. Les ligaments puboprostatiques sont

ensuite isolés et sectionnés avec précision, sans utiliser de coagulation près des faisceaux neurovasculaires afin d'éviter tout dommage nerveux. La dissection des faisceaux neurovasculaires débute sur la partie antérieure supérieure de la prostate. Ces faisceaux sont mobilisés et repoussés latéralement avec soin. La capsule prostatique sert de repère visuel pour guider la dissection.

Les saignements mineurs sont contrôlés à l'aide de clips ou de sutures résorbables, sans recours à la coagulation, afin de préserver les nerfs. Une fois les faisceaux neurovasculaires libérés, l'urètre et le sphincter sont préparés. La dissection est effectuée avec précision pour préserver un maximum de tissu fonctionnel. L'urètre est incisé à environ 3 mm au-dessus de l'apex de la prostate, garantissant ainsi une longueur fonctionnelle optimale.

Pour relier l'urètre à la vessie, une anastomose uréthro-vésicale est réalisée à l'aide de cinq points de suture interrompus. Ces sutures minimisent le risque de sténose et assurent une traction optimale de l'urètre membraneux. Pendant la procédure, les vésicules séminales sont également retirées. Le fascia de Denonvilliers est incisé pour exposer les vésicules, tout en évitant l'utilisation de la coagulation afin de préserver les nerfs situés à proximité.

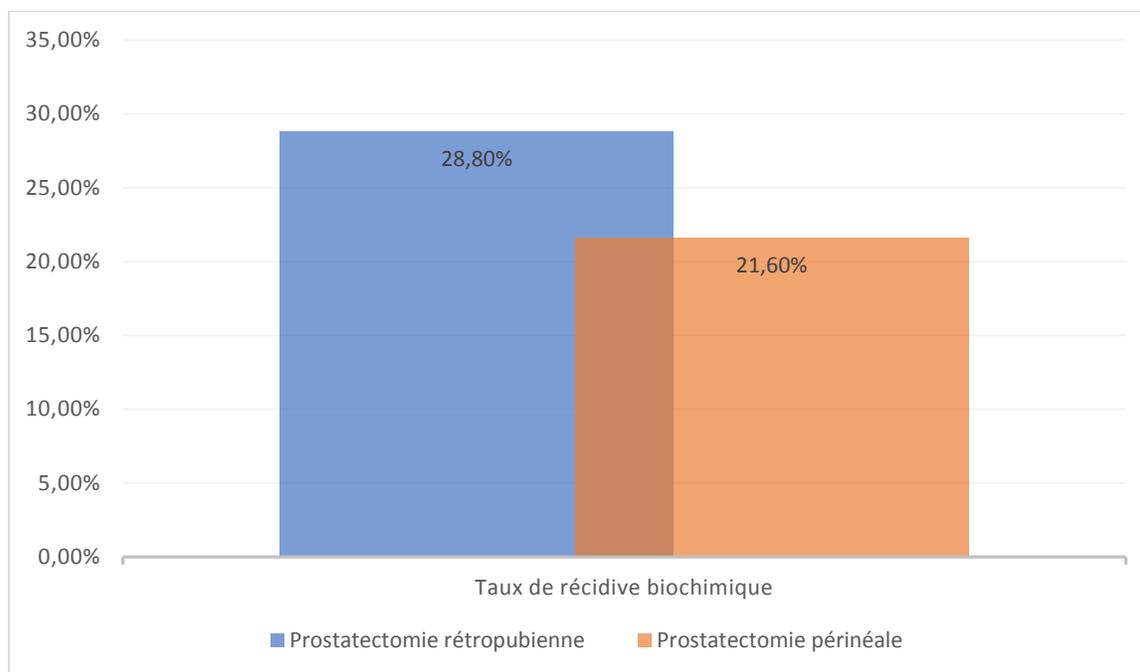
La décision de réaliser une préservation des nerfs, qu'elle soit bilatérale ou unilatérale, est basée sur des nomogrammes prédictifs et des analyses peropératoires de sections congelées. Ces analyses permettent de détecter les marges positives et d'ajuster la dissection pour maximiser la sécurité oncologique tout en préservant les structures nerveuses [135].

**2.1. Résultats :**

Une étude rétrospective portant sur 200 patients opérés d'une prostatectomie radicale rétropubienne entre 1990 et 2000 a révélé un taux de marges chirurgicales positives de 17%. Parmi ces cas, 8 patients (4%) présentaient une atteinte tumorale au niveau des marges postéro-latérales, zone de préservation neurovasculaire. Concernant la fonction sexuelle, 70 % des 157 patients évaluables à deux ans ont retrouvé une activité sexuelle sans recours à des traitements médicamenteux [198].

**2.2. Comparaison entre PRR et PRP :**

Comparée à la prostatectomie périnéale, la prostatectomie rétropubienne était associée à un taux de récurrence biochimique significativement plus élevé (28,8% vs 21,6%,  $p=0,03$ ). Cependant, les taux de récurrence locale, de survie spécifique au cancer et de survie globale étaient similaires entre les deux groupes. Les marges chirurgicales positives étaient également comparables.



**Graphique 11: Comparaison des taux de récurrence biochimique entre les prostatectomies périnéales et rétropubiennes.**

Les patients ayant subi une RPP ont rapporté moins de douleur postopératoire, moins de transfusions et un temps de cathétérisme plus court. À 18 et 24 mois, la continence était meilleure dans le groupe RPP (96,9% vs 91,8–92,3% pour la RRP,  $p < 0,05$ ). La récupération de la fonction érectile était également plus rapide et plus complète dans le groupe RPP [199].

### **III. La Laparoscopie en Chirurgie de la Prostate :**

#### **1. Introduction :**

La prostatectomie radicale laparoscopique (PRL) représente une avancée majeure dans le traitement chirurgical du cancer localisé de la prostate. Cette approche minimalement invasive offre des résultats comparables à la

prostatectomie radicale rétropubienne traditionnelle en termes de contrôle oncologique et de préservation fonctionnelle. La technique décrite dans cet article se distingue par une dissection intrafasciale qui vise à préserver les faisceaux neurovasculaires (FNV) tout en minimisant les traumatismes mécaniques et thermiques. Cette méthode innovante repose sur plusieurs étapes clés permettant une préservation optimale des structures anatomiques essentielles à la continence urinaire et à la fonction érectiles.

## **2. Histoire de la Laparoscopie en Chirurgie de la Prostate : Les débuts de la laparoscopie :**

La laparoscopie, aujourd'hui une technique chirurgicale incontournable, a connu une évolution fascinante depuis ses débuts. Elle tire ses origines du mot grec "endoskopein", signifiant "observer l'intérieur du corps" [200]. Dès l'Antiquité, des instruments rudimentaires tels que le spéculum permettait déjà d'explorer certaines cavités corporelles. Cependant, l'absence d'une source lumineuse puissante limitait ces examens à des orifices facilement accessibles comme le rectum et le vagin.

Il faudra attendre la fin du XIXe siècle et l'invention de la lampe électrique par Thomas Edison pour voir apparaître des outils d'exploration plus performants, permettant d'éclairer en profondeur les cavités corporelles [200].

En 1901, lors d'une conférence intitulée « À propos de l'examen de l'œsophage et de l'estomac à l'aide d'instruments flexibles », le chirurgien et gastro-entérologue allemand Georg Kelling (Figure 70) a réalisé la première laparoscopie sur un chien. C'est à cette occasion qu'il a introduit le terme « cœlioscopie » pour désigner cette nouvelle procédure [201].



**Figure 70:Dr. Georg Kelling**

Peu après, Hans-Christian Jacobaeus a effectué les premières laparoscopies humaines, marquant le début de l'exploration endoscopique des cavités corporelles [202].

Cependant, ces techniques restaient limitées à des fins diagnostiques. Ce n'est qu'entre les années 1960 et 1980 que la laparoscopie a véritablement évolué vers des interventions chirurgicales, grâce aux travaux de pionniers comme Raoul Palmer et Kurt Semm. Kurt Semm, un gynécologue et mécanicien de précision, a joué un rôle central dans cette révolution. En 1980, il a réalisé la première appendicectomie laparoscopique, un exploit qui a suscité de vives

critiques de la part de la communauté médicale, notamment des chirurgiens [202,203].

Aujourd'hui, la laparoscopie est au cœur de la chirurgie moderne. Les progrès technologiques, tels que l'intégration de l'intelligence artificielle et de la réalité augmentée, promettent de transformer encore davantage cette discipline. Toutefois, des défis subsistent, notamment le coût élevé des équipements et la nécessité d'une formation spécialisée. Malgré cela, la laparoscopie reste l'une des plus grandes réussites de l'histoire de la médecine, offrant des solutions moins invasives et plus sûres pour les patients [200].

### 3. Technique de la Prostatectomie Radicale Laparoscopique

#### « Nerve-Sparing » :

##### 3.1. Introduction :

La prostatectomie radicale laparoscopique (PRL) représente une avancée majeure dans le traitement chirurgical du cancer localisé de la prostate. Cette approche minimalement invasive offre des résultats comparables à la prostatectomie radicale rétropubienne traditionnelle en termes de contrôle oncologique et de préservation fonctionnelle. La technique décrite dans cet article se distingue par une dissection intrafasciale qui vise à préserver les faisceaux neurovasculaires (FNV) tout en minimisant les traumatismes mécaniques et thermiques. Cette méthode innovante repose sur plusieurs étapes clés permettant une préservation optimale des structures anatomiques essentielles à la continence urinaire et à la fonction érectile.

### **3.2. Préparation et Accès :**

La PRL peut être réalisée par une approche transpéritonéale ou extrapéritonéale, selon les caractéristiques anatomiques du patient. Dans l'approche transpéritonéale, une incision en forme de U inversé est réalisée entre les ligaments ombilicaux médiaux pour accéder à l'espace de Retzius. Dans l'approche extrapéritonéale, cet espace est directement ouvert et le péritoine est mobilisé à l'aide de l'optique laparoscopique.

### **3.3. Exposition du Fascia Endopelvien :**

Une fois l'espace de Retzius exposé, une dissection soignée du tissu permet d'identifier les ligaments puboprostatiques et le complexe veineux dorsal. Contrairement aux techniques traditionnelles, la veine dorsale superficielle est coagulée et sectionnée. Le fascia endopelvien, ainsi que toute artère pudendale accessoire potentielle, sont préservés, et les ligaments puboprostatiques ne sont pas sectionnés.

### 3.4. Dissection du col vésical :

La dissection débute au niveau du col vésical (Figure 71) dans le but de prévenir tout saignement qui pourrait survenir depuis l'apex vers la zone

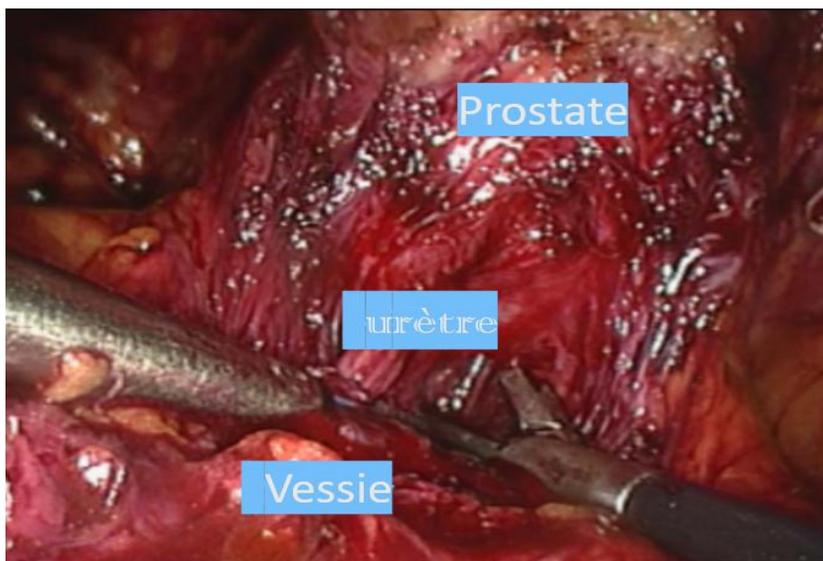


Figure 71:Dissection du col vésical

inférieure du champ opératoire. On identifie la base de la prostate, puis les fibres musculaires situées à l'avant du col vésical sont disséquées sur les côtés après avoir dégonflé le ballonnet du cathéter.

La séparation totale du col vésical crée un espace postérieur, et la dissection contourne l'urètre, qui est préservé. Après section de l'urètre, la vessie est libérée de la prostate en disséquant les fibres au niveau des pédicules prostatiques principaux, ce qui facilite l'accès aux canaux déférents et aux vésicules séminales sans traction. Les pédicules prostatiques sont ensuite disséqués à froid pour préserver le fascia périprostatique et protéger les

faisceaux neurovasculaires. Les fibres verticales du fascia antérieure de Denonvilliers sont incisées.

Les canaux déférents sont disséqués et sectionnés une fois l'extrémité des vésicules séminales visible. Les vaisseaux entre les canaux déférents et les vésicules séminales sont clipsés avant d'être sectionnés. Pour éviter d'endommager les faisceaux neurovasculaires et le plexus pelvien proches des vésicules séminales, aucune énergie thermique ou électrique n'est utilisée.

### **3.5. Dissection des Vésicules Séminales et des Pédicules Prostatiques :**

Les vésicules séminales sont disséquées de manière atraumatique en utilisant une dissection froide. Les pédicules prostatiques sont sécurisés par des clips hémostatiques avant d'être sectionnés. Une attention particulière est portée à la préservation du fascia périprostatique, qui contient les faisceaux neurovasculaires. La dissection intra-fasciale, réalisée en contact direct avec la capsule prostatique, permet de minimiser les risques de lésions nerveuses et hémorragiques.

### **3.6. Préservation des Faisceaux Neurovasculaires (FNV) :**

La préservation des faisceaux neuro-vasculaires (FNV) est un enjeu majeur dans la chirurgie nerve-sparing. La dissection intrafasciale, qui consiste à refléter le fascia prostatique sans inciser le fascia pelvien latéral, est essentielle pour éviter de pénétrer dans l'espace contenant les FNV. Une traction douce permet de libérer délicatement ces structures, tout en évitant l'utilisation d'énergie thermique ou électrique afin de minimiser les risques de lésions nerveuses irréversibles.

### **3.7. Dissection Apicale et Contrôle du Complexe Veineux Dorsal (CVD) :**

À l'apex de la prostate, le complexe veineux dorsal (CVD) est préparé avec précision. Il est sectionné à l'aide de ciseaux froids, sans ligature préalable, afin de limiter les saignements post-opératoires. La division de l'urètre est réalisée en deux temps : dissection des tissus péri-urétraux puis section de l'urètre. Une suture en Vicryl 3/0 est utilisée pour sécuriser le CVD, assurant une hémostase rigoureuse et une excellente exposition du champ opératoire.

### **3.8. Anastomose Uréthro-Vésicale :**

L'anastomose uréthro-vésicale est réalisée de manière continue avec un fil monofilament résorbable. Le cathéter sert de guide pour assurer une coaptation précise des berges. L'étanchéité de l'anastomose est rigoureusement vérifiée par une injection de 200 ml de sérum physiologique. Le drain pelvien est retiré au deuxième jour postopératoire et le cathéter est retiré après une semaine [204].

## **4. Les avancées majeures en chirurgie laparoscopique en urologie :**

Au cours des dernières décennies, la chirurgie laparoscopique a connu des progrès considérables, transformant profondément la pratique de l'urologie. Ces avancées technologiques ont permis d'améliorer la précision des interventions, de réduire les complications post-opératoires, et d'offrir des résultats cliniques optimisés pour les patients.

### **4.1. Améliorations des technologies vidéo :**

L'avènement de la vidéo haute définition (HD), puis de l'ultra haute définition (4K UHD), a révolutionné la laparoscopie. La 4K UHD, en particulier,

fournit une résolution quatre fois supérieure à la HD standard, permettant une identification plus précise des détails anatomiques.

#### **4.2. Dispositifs chirurgicaux avancés :**

Une autre avancée majeure concerne le développement d'instruments chirurgicaux de nouvelle génération, tels que les systèmes LigaSure® et THUNDERBEAT®. Ces dispositifs combinent coagulation et dissection, offrant une hémostase rapide et précise, tout en réduisant le traumatisme tissulaire. Ils permettent ainsi de gagner du temps opératoire et d'améliorer la qualité des gestes chirurgicaux. Par ailleurs, Les dispositifs de suture mécanique, tels que l'EndoStitch™ (Figure 72) et les sutures barbelées (V-Lock®), ont révolutionné la réalisation des anastomoses complexes, en particulier uréthro-vésicales. Ces outils offrent une précision, une rapidité et une fiabilité accrues, réduisant ainsi le risque de complications liées à la suture manuelle et standardisant la qualité des sutures [205].



**Figure 72:Endo Stitch™**

### **4.3. Chirurgie à site unique et mini-laparoscopie :**

La chirurgie laparoscopique à site unique (LESS) et la mini-laparoscopie représentent des approches innovantes visant à réduire les traumatismes d'accès et à améliorer les résultats esthétiques. Bien que prometteuses, ces techniques présentent des limitations techniques et n'ont pas encore démontré d'avantages clairs par rapport à la laparoscopie classique dans les indications urologiques courantes, telles que la prostatectomie radicale [205].

### **5. Conclusion :**

Les avancées technologiques continuent de transformer la pratique de la chirurgie laparoscopique en urologie. L'expiration de brevets clés sur les systèmes robotiques devrait stimuler la concurrence et réduire les coûts, rendant ces technologies plus accessibles. Par ailleurs, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour optimiser l'intégration des nouvelles technologies, telles que les plateformes robotiques et les instruments flexibles, dans la pratique clinique quotidienne.

En conclusion, les progrès en chirurgie laparoscopique, qu'ils concernent la technologie vidéo, les instruments chirurgicaux ou les systèmes robotiques, ont considérablement amélioré les résultats pour les patients et facilité le travail des chirurgiens. Ces innovations représentent un pilier essentiel pour l'avenir de l'urologie moderne.

## **IV. La Chirurgie Robotique en Prostatectomie : Avancées, Techniques et Perspectives**

### **1. Introduction :**

La prostatectomie robotique est une technique chirurgicale novatrice qui a transformé le traitement du cancer de la prostate. Elle repose sur l'utilisation de la chirurgie assistée par robot, principalement par le biais du **système Da Vinci**, qui permet aux chirurgiens de réaliser des interventions avec une grande précision et une vision 3D. Ce chapitre explore l'histoire et l'évolution de la prostatectomie robotique, de ses premières expérimentations à son adoption généralisée.

## 2. Les premières étapes et l'introduction de la robotique en chirurgie :



**Figure 73: Programmable Universal Machine for Assembly (PUMA® 200)**

Les robots ont fait leur entrée dans le domaine de la chirurgie il y a plus de deux décennies, initialement dans des spécialités caractérisées par des repères anatomiques stables comme la neurochirurgie et l'orthopédie.

Le tout premier robot chirurgical, l'Arthrobot, a été mis en œuvre à Vancouver en 1983 [206], suivi par le Programmable Universal Machine for Assembly (PUMA®), un robot industriel adapté à la chirurgie par Unimation dès 1985, a servi à manipuler des instruments lors de biopsies cérébrales stéréotaxiques (Figure 73) [207] et, par la suite, à réséquer des astrocytomes du thalamus chez des enfants [208].

Ce fut une étape importante dans l'introduction des robots dans les environnements chirurgicaux, bien que le domaine de la chirurgie viscérale, plus complexe en raison de la mobilité des organes, n'ait pas été immédiatement exploré.

En 1992, le système **ROBODOC®**, développé par Integrated Surgical Systems Inc., a été utilisé en orthopédie pour la mise en place de prothèses totales de hanche, permettant d'augmenter la précision du fraisage du fût fémoral en fonction de données préopératoires et peropératoires. Ces premières applications ont posé les bases d'une robotique chirurgicale plus sophistiquée et plus ciblée.

L'histoire de la chirurgie assistée par robot trouve ses origines dans la Silicon Valley, aux États-Unis, avec le développement de la puce en silicium

Les progrès rapides de la microélectronique, notamment l'invention des microprocesseurs, ont été déterminants dans l'accélération du développement de la robotique chirurgicale [209]. Les premiers dispositifs robotiques utilisant cette technologie ont été développés par deux entreprises basées aux États-Unis : « Computer Motion Inc. » et « Intuitive Surgical Inc. » [209].

Computer Motion Inc. a introduit le dispositif AESOP (« Automated Endoscopic System for Optimal Positioning ») (Figure 74) qui se compose d'un bras robotique fixé à la table d'opération et d'un système informatique avec reconnaissance vocale spécifique au chirurgien. Ce système améliore la stabilité de l'image, réduit les mouvements accidentels de l'endoscope et diminue le besoin de personnel en salle d'opération. Utilisé dans des centaines de milliers d'interventions minimalement invasives (digestive, urologique, thoracique, cardiaque), il marque une étape clé dans l'introduction de la robotique en chirurgie [210].



**Figure 74:Robot médical AESOP d'Intuitive Surgical.**

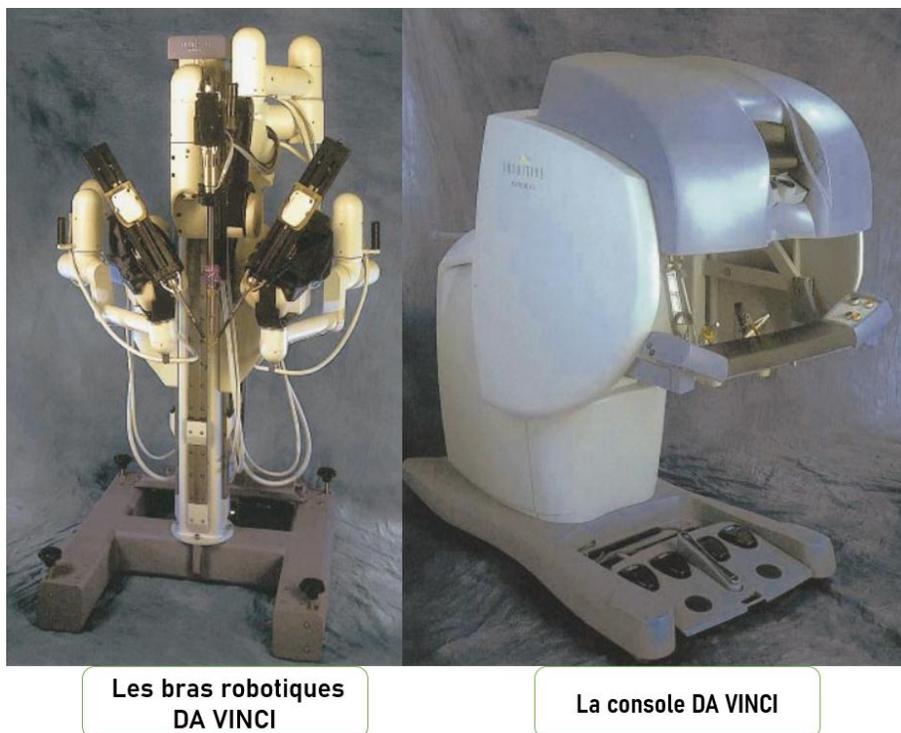
Quelques années plus tard, la société a amélioré ce système avec le télémanipulateur ZEUS, composé de deux sous-systèmes physiquement séparés nommés « côté chirurgien » et « côté patient ». Le poste de travail du chirurgien

est équipé d'une console qui capte les mouvements du praticien. Ces commandes sont transmises à un système robotique composé de trois bras : deux manipulent les instruments chirurgicaux (pinces, ciseaux, crochets...) tandis que le troisième contrôle la caméra endoscopique., formant ainsi un système « maître-esclave » [211].



**Figure 75: Composantes du robot ZEUS**

Cependant, c'est Intuitive Surgical Inc. qui a révolutionné le domaine en 1999 avec son système chirurgical **Da Vinci**, financé en grande partie par le département de la Défense des États-Unis.



**Figure 76: Composantes du robot DA VINCI (1999)**

C'est en 2000, à l'université de Francfort en Allemagne, que la première prostatectomie radicale assistée par robot a été menée à bien grâce au système da Vinci [212]. De plus, il a été démontré que la technique robotique est plus sûre et entraîne moins de pertes sanguines. Cela a conduit à une adoption rapide de la PRAR aux États-Unis, en Europe et dans le reste du monde [213].

Le système da Vinci s'est rapidement imposé comme la référence en matière de prostatectomie radicale. La chirurgie robotique a considérablement réduit la courbe d'apprentissage des chirurgiens par rapport à la laparoscopie traditionnelle. En outre, les patients privilégient la robotique en raison d'une approche moins invasive, d'un séjour hospitalier raccourci et d'une récupération fonctionnelle plus rapide [214].

### **3. Transition des Techniques Traditionnelles vers la PRAR :**

Avant l'avènement de la laparoscopie, la prostatectomie radicale ouverte (RP) était la norme de référence [215]. Cette technique, décrite par Walsh et ses collègues dans les années 1980, permettait une meilleure préservation des fonctions nerveuses et une réduction des pertes sanguines. Dans les années 1990, la prostatectomie radicale laparoscopique (LRP) est apparue comme une alternative mini-invasive, bien que son efficacité ait fait l'objet de nombreux débats [215].

Bien que la LRP ait montré des résultats oncologiques et fonctionnels similaires à ceux de la RP ouverte, elle présentait une courbe d'apprentissage longue, ce qui a limité son adoption par les chirurgiens. L'introduction de la PRAR a changé cette dynamique. Contrairement à la LRP, la PRAR présente une courbe d'apprentissage plus courte et peut être adoptée par des chirurgiens sans expérience laparoscopique [216]. Cela a permis à de nombreux chirurgiens expérimentés en chirurgie ouverte de passer plus facilement à la chirurgie assistée par robot.

Le système Da Vinci® est composé de trois éléments principaux :

#### **1. La Console du Chirurgien :**

Elle est équipée d'un système de vision binoculaire stéréoscopique qui offre une image tridimensionnelle du champ opératoire. Les mouvements des mains du chirurgien sont transmis aux instruments via des poignées, permettant un contrôle précis des gestes chirurgicaux. Un

dispositif de démultiplication des mouvements et un module de filtration réduisent le tremblement physiologique, améliorant ainsi la précision

## 2. Le Chariot-Patient :

Ce composant porte les bras articulés du robot. Dans les versions plus récentes, comme le Da Vinci S® et le Da Vinci Si®, le chariot est équipé de quatre bras. Un bras est dédié à la caméra, tandis que les autres manipulent les instruments, qui possèdent sept degrés de liberté grâce à l'articulation Endowrist®.

## 3. La Tour d'Imagerie :

Elle contient un insufflateur, une source lumineuse et une double caméra. Cette tour permet de transmettre l'image du champ opératoire à l'équipe chirurgicale présente aux côtés du patient [217].



**Figure 77: Composantes du Système DA VINCI**

#### **4. Avantages et Limites de la PRAR :**

La PRAR présente plusieurs avantages par rapport aux techniques traditionnelles, notamment une réduction des pertes sanguines, une récupération plus rapide, et une meilleure ergonomie pour le chirurgien [218].

Comparée à la chirurgie ouverte, la prostatectomie radicale assistée par robot est associée à une diminution des marges chirurgicales positives, à une récupération plus rapide de la fonction sexuelle et à une réduction des pertes sanguines, limitant ainsi le recours aux transfusions. Néanmoins, la durée de l'intervention est généralement plus longue [219].

La chirurgie robotique offre aussi des avantages significatifs par rapport à la laparoscopie conventionnelle, notamment en réduisant la durée d'hospitalisation. Bien que les données sur la continence urinaire à long terme soient similaires [219], la PRAR permet une récupération plus rapide de cette fonction dans les premiers mois suivant l'intervention, ainsi qu'une meilleure préservation de la fonction érectile chez les patients les plus jeunes et les plus actifs sexuellement [220].

Cependant, les coûts élevés des systèmes robotiques restent un obstacle majeur, L'investissement requis pour acquérir un robot da Vinci se situe entre 0,5 et 2,5 millions de dollars, selon le modèle, la configuration et l'emplacement géographique. Néanmoins, il est important de noter que ces chiffres n'incluent pas les coûts indirects, tels que les frais de service annuels pouvant s'élever à 190 000 dollars, ainsi que le coût récurrent des instruments et accessoires, qui peut varier de 600 à 3 500 dollars par opération chirurgicale [221,222].

L'expiration des brevets sur les systèmes robotiques devrait accélérer le développement de nouvelles solutions technologiques et réduire les coûts associés, rendant ces technologies plus accessibles. Cependant, pour que ces avancées bénéficient pleinement aux patients, il est crucial de mener des recherches cliniques rigoureuses afin d'évaluer l'efficacité et la sécurité de ces nouvelles technologies dans des contextes variés [205].

## **5. Technique Chirurgicale : VIP**

La première prostatectomie radicale réalisée à Francfort, combinant des approches antérograde et rétrograde, a marqué un tournant dans la chirurgie de la prostate. Depuis, de nombreuses techniques ont vu le jour, parmi lesquelles la technique de l'Institut Vattikuti (VIP), développée par Menon et son équipe [223], s'est imposée comme la référence en matière de prostatectomie radicale assistée par robot.

### **Positionnement du Patient et Placement des Ports**

Le patient est placé en position de lithotomie, avec un pneumopéritoine créé pour faciliter l'accès chirurgical. Une approche à six ports est généralement utilisée, permettant une manipulation optimale des instruments robotiques.

### **Instruments Robotiques**

Les instruments robotiques de 5 mm sont préférés pour leur précision et leur maniabilité. Les outils de base incluent le crochet monopolaire, les ciseaux à bout rond, une pince bipolaire Maryland ou triangulaire, et un porte-aiguille.

### **Développement de l'Espace Extrapéritonéal**

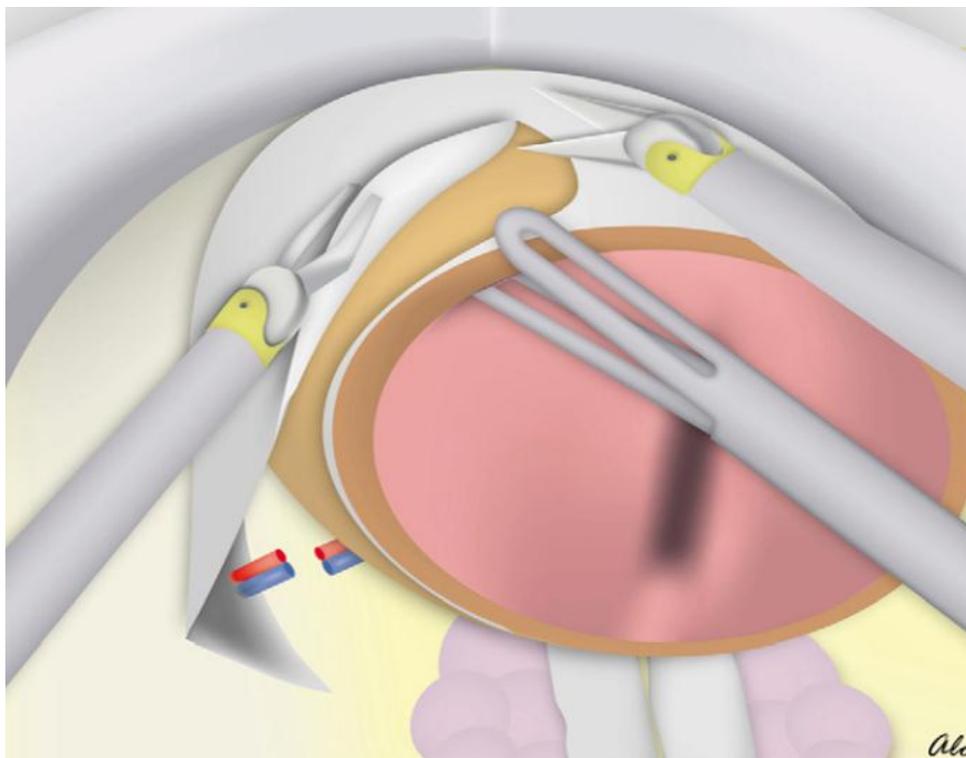
Une incision péritonéale transverse est réalisée pour accéder à l'espace de Retzius, où la chirurgie se déroule principalement. Cette approche permet une meilleure visualisation et manipulation de la prostate et des structures environnantes.

### **Dissection des Ganglions Lymphatiques**

La dissection commence au niveau du ganglion de Cloquet et se poursuit vers la bifurcation des vaisseaux iliaques. Le nerf obturateur est soigneusement préservé pour minimiser les complications neurologiques.

### **Technique de Préservation Nerveuse : le « Voile d'Aphrodite »**

La technique du « voile d'Aphrodite » consiste à inciser le fascia prostatique antérieurement pour préserver les nerfs caverneux, qui forment parfois des réseaux plutôt que des faisceaux distincts. Cette approche vise à maximiser la conservation de la fonction érectile. Un plan de dissection est méticuleusement développé entre la capsule prostatique et le fascia prostatique en direction crâniale. Grâce à une contre-traction adéquate, le chirurgien accède à un plan profond par rapport aux sinus veineux du plexus de Santorini. Une dissection minutieuse, combinant techniques tranchantes et émoussées, permet de mobiliser l'ensemble du fascia prostatique jusqu'au ligament pubo-prostatique, en préservant le faisceau neurovasculaire. Ce plan de clivage, essentiellement avasculaire, sauf en antérieur, révèle le **voile d'Aphrodite**, une structure caractéristique formée par les rideaux de tissu périprostatique.



**Figure 78: Plan de dissection du voile d'Aphrodite**

**Contrôle de l'Apogée Prostatique et du Complexe Veineux Dorsal :**

Pour exposer l'apex prostatique, une lentille à 0° est utilisée, ce qui permet une meilleure visualisation, surtout chez les patients ayant une symphyse pubienne proéminente. Une fois le fascia prostatique latéral disséqué, la prostate est rétractée avec force apicalement.

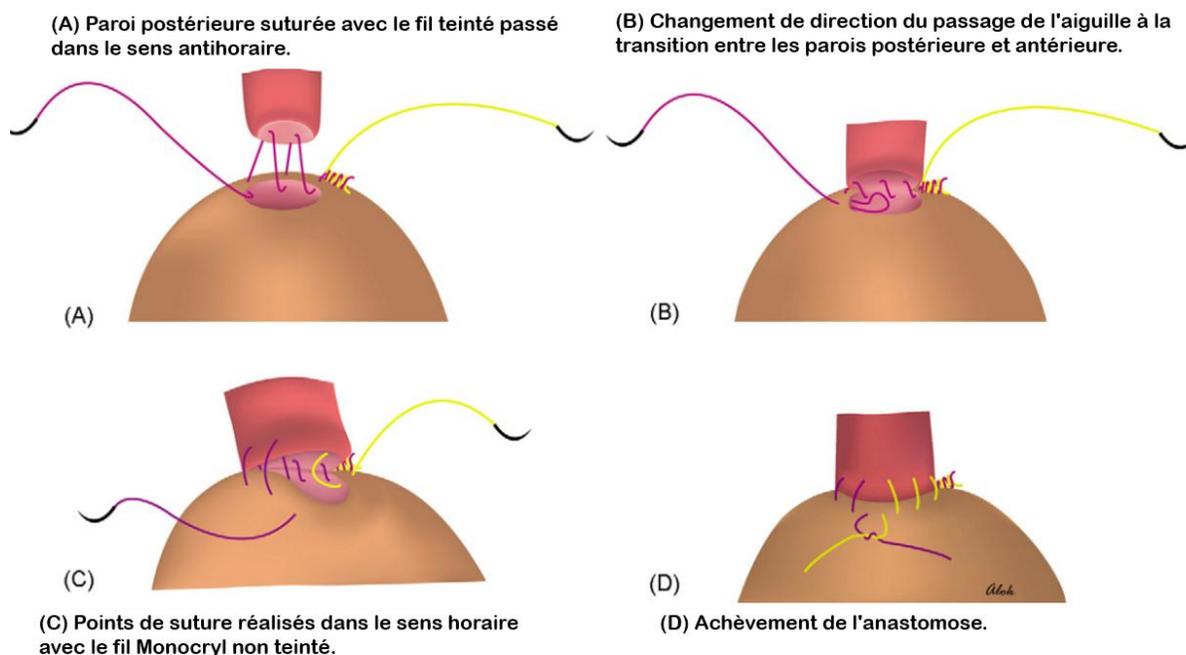
Le ligament puboprostatique est ensuite incisé avec des ciseaux à froid, en prenant soin de ne pas isoler l'urètre pour préserver un soutien fibro-vasculaire, favorisant ainsi un retour rapide à la continence. L'urètre est alors sectionné à environ 5 mm en aval de l'apex prostatique.

Une dissection minutieuse de l'apex prostatique est effectuée afin de préserver les structures nerveuses critiques. Le complexe veineux dorsal est contrôlé par des sutures pour minimiser les saignements post-opératoires.

Le complexe veineux dorsal, capable de provoquer des saignements notables, est géré par des sutures continues. Cette gestion peut se faire avant ou après la section de l'urètre, selon le degré d'hémorragie observé. Cette étape est primordiale pour minimiser les pertes sanguines et garantir une opération chirurgicale propre et efficace.

### Anastomose Uréthro-Vésicale

Une suture en continu est utilisée pour l'anastomose uréthro-vésicale, assurant une connexion solide et étanche entre l'urètre et la vessie. Cette technique réduit le risque de fuites urinaires postopératoires [223].



**Figure 79: Anastomose uréthro-vésicale**

## 6. Perspectives Futures :

L'avenir de la chirurgie assistée par robot s'annonce prometteur, avec des développements attendus dans la réduction des coûts, l'intégration de

reconstructions 3D basées sur l'IRM, et l'utilisation de techniques moins invasives. La téléchirurgie représente un autre axe de développement prometteur de la chirurgie assistée par robot. Cette technologie a fait une entrée remarquée en 2001 lors de la première intervention transatlantique entre New York et Strasbourg [224].

La téléchirurgie a connu un essor considérable avec l'arrivée de la 5G, réduisant les contraintes géographiques et permettant l'émergence d'interventions chirurgicales intercontinentales.

La téléchirurgie a fait un bond en avant avec la réalisation de la première prostatectomie intercontinentale par le Groupe ONCORAD, démontrant ainsi le potentiel de cette technologie pour révolutionner la chirurgie.

À distance, depuis la ville de Shanghai en Chine, le Dr Youness Ahallal (Figure 80), expert en urologie et en chirurgie robotique, a réalisé l'intervention sur un patient situé à Casablanca en collaboration avec une équipe médicale locale.



**Figure 80:Dr Youness Ahallal**

Grâce à une connexion ultra-rapide offrant un débit garanti et une latence quasi nulle, les commandes du chirurgien situé à Shanghai ont été transmises en temps réel au robot opérant au Maroc, surmontant ainsi la distance de 12000 kilomètres [225].



Figure 81: Prostatectomie robotisée réalisée sur un patient à Casablanca par le docteur Ahallal Youness en Chine.

## 7. Conclusion :

La chirurgie robotique, et en particulier la prostatectomie robotique, a fait des progrès considérables grâce aux innovations technologiques des dernières décennies. De ses débuts dans les domaines de la neurochirurgie et de l'orthopédie, la robotique a progressivement envahi la chirurgie viscérale, avec la prostatectomie robotique comme l'une de ses applications les plus réussies. La combinaison de la **téléchirurgie**, de la **chirurgie laparoscopique** et des avancées technologiques, comme le système **Da Vinci**, a permis aux chirurgiens

de traiter le cancer de la prostate avec une précision inégalée et de réduire considérablement les risques associés aux procédures chirurgicales. L'avenir de la chirurgie robotique semble prometteur, avec des améliorations continues en matière de technologie et d'intelligence artificielle qui transformeront encore davantage cette discipline.

## **V. RTUP**

### **1. RTUP : Une Révolution dans le Traitement de l'HBP et des Symptômes du Bas Appareil Urinaire (LUTS) :**

L'hyperplasie bénigne de la prostate (HBP) est la pathologie bénigne de la prostate la plus courante chez les hommes septuagénaires, avec une prévalence qui augmente de manière significative avec l'âge. Des études autopsiques ont observé une prévalence histologique de 8 %, 50 % et 80 % respectivement dans les 4e, 6e et 9e décennies de vie [226].

L'HBP devient cliniquement significative lorsqu'elle induit des symptômes du bas appareil urinaire (LUTS), affectant entre 50 % et 75 % des hommes de plus de 50 ans et jusqu'à 80 % des hommes septuagénaires [227].

Afin d'aider à définir la source du problème, les LUTS sont classés en symptômes de vidange, de stockage ou post-mictionnels :

Les symptômes de vidange incluent :

- Un flux urinaire faible
- Un flux urinaire intermittent,
- Strangurie
- Hésitation mictionnelle

- Sensation de vidange incomplète

Les symptômes de stockage incluent :

- Incontinence urinaire d'urgence
- Urgenturie
- Pollakiurie
- Nycturie

Le principal symptôme post-mictionnel est le dribble post-mictionnel, qui désigne l'évacuation involontaire de quelques gouttes d'urine après la fin de la miction. Il s'agit d'un symptôme fréquent et gênant [228].

La résection transurétrale de la prostate (RTUP) **constitue** une avancée majeure dans l'histoire de la chirurgie urologique. En 1926, le docteur Maximilian Stern (Figure 82) a présenté un instrument novateur, le résectoscope, conçu pour traiter les obstructions au niveau de l'orifice vésical. Cette innovation a marqué le début de la RTUP, une méthode endoscopique qui a rapidement gagné en popularité grâce à sa capacité à traiter de manière non invasive [229].



**Figure 82:Dr. Maximilian Stern**

Malgré les critiques initiales, la RTUP est devenue, dès les années 1930, le traitement de référence pour l'obstruction infravésicale causée par l'HBP. Depuis près d'un siècle, la résection transurétrale de la prostate (RTUP) s'est imposée comme une référence incontournable en urologie, grâce à son efficacité clinique, ses faibles taux de complications et ses résultats durables. Qualifiée de « standard historique » et de « meilleur gold standard » par les recommandations de l'Association américaine d'urologie, elle reste la procédure la plus fréquemment enseignée et utilisée pour le traitement de l'hyperplasie bénigne de la prostate (HBP) symptomatique, et celle avec laquelle presque tous les urologues ont de l'expérience et la capacité de l'effectuer [230].

Cependant, au cours des 20 à 30 dernières années, le nombre total de RTUP réalisées a diminué, principalement en raison de l'introduction de traitements médicaux comme première ligne de gestion des LUTS dans les années 1990 [231]. Cette évolution a conduit à une modification des indications

de la RTUP et les patients qui subissent cette intervention présentent désormais plus fréquemment des indications absolues, telles que la rétention urinaire ou l'insuffisance rénale, plutôt que des symptômes simplement gênants [232].

L'un des développements les plus notables dans l'histoire de la RTUP a été l'introduction des instruments bipolaires. Bien que le résectoscope original de Stern fût techniquement bipolaire, les instruments monopolaires ont dominé la pratique pendant près de sept décennies. Ce n'est qu'au début des années 2000 que les instruments bipolaires ont été réintroduits, offrant des avantages significatifs, notamment la possibilité d'effectuer la procédure dans une solution saline isotonique, réduisant ainsi le risque de syndrome de résection transurétrale, en plus réduire le risque de dysurie postopératoire et le recours à la perfusion sanguine. Ces avancées ont permis de renforcer la sécurité de la RTUP et d'élargir son champ d'application [233,234].

Selon les dernières recommandations européennes urologie, la résection transurétrale de la prostate (RTUP), qu'elle soit bipolaire ou monopolaire, est recommandée comme traitement chirurgical de référence pour les symptômes du bas appareil urinaire (SBAU) modérés à sévères chez les hommes présentant une hyperplasie bénigne de la prostate dont le volume est compris entre 30 et 80 ml [235].

## **2. Principe de la RTUP :**

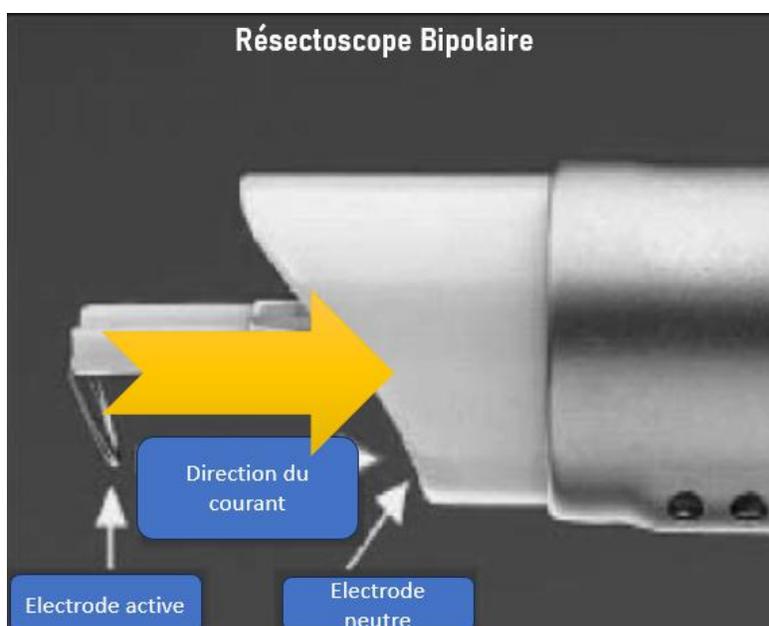
### **2.1. Principe de la Technique Monopolaire :**

La RTUP monopolaire repose sur l'utilisation d'un courant électrique à haute fréquence (jusqu'à 200 watts) pour couper et coaguler les tissus prostatiques. Une électrode active est insérée via un résectoscope, tandis qu'une électrode neutre est placée sur la peau du patient pour fermer le circuit électrique. La coagulation et la coupe dépendent de la puissance et de la tension appliquées, ajustées en temps réel par un générateur microprocesseur.

Pour permettre une visibilité optimale et éviter les brûlures thermiques, un liquide d'irrigation non conducteur, tel que la glycine, est utilisé. Cependant, ce choix comporte des risques, notamment l'absorption de liquide pouvant provoquer le syndrome de résection transurétrale (TUR syndrome), caractérisé par une hyponatrémie sévère.

## **2.2. Principe de la Technique Bipolaire :**

Contrairement à la technique monopolaire, la RTUP bipolaire utilise une électrode active et une électrode neutre intégrées dans le même instrument (Figure 83). Le courant électrique circule uniquement entre ces deux électrodes, ce qui permet l'utilisation d'une solution saline (0,9 % de chlorure de sodium) comme liquide d'irrigation. Cette configuration réduit considérablement le risque de TUR syndrome [236].



**Figure 83:Résectoscope bipolaire**

Le courant haute fréquence (jusqu'à 400 watts) crée une couche de vapeur (plasma) à l'interface entre l'électrode et le tissu prostatique. Ce plasma contient des particules énergétiques qui induisent la dissociation moléculaire des tissus, permettant une coupe et une coagulation précises à une température plus basse que celle de la technologie monopolaire [236].

### **3. Avantages des deux techniques :**

#### **3.1. Avantages de la Technique Monopolaire :**

Malgré l'émergence de la technologie bipolaire, la RTUP monopolaire reste largement utilisée en raison de ses caractéristiques éprouvées :

- **Efficacité clinique** : La RTUP monopolaire offre une vitesse de résection comparable à celle des dispositifs bipolaires, avec des taux de complications postopératoires globalement faibles lorsque la technique est bien maîtrisée.
- **Coût initial moindre** : Les équipements monopolaires sont généralement moins coûteux que les dispositifs bipolaires, ce qui les rend accessibles dans des contextes hospitaliers à ressources limitées.

Cependant, les inconvénients incluent un risque accru de TUR syndrome, une coagulation thermique plus profonde pouvant endommager les tissus environnants, et une nécessité de surveillance accrue pour éviter l'absorption excessive de liquide.

#### **3.2. Avantages de la Technique Bipolaire :**

La RTUP bipolaire présente plusieurs avantages significatifs par rapport à la méthode monopolaire :

- **Réduction du risque de TUR syndrome** : L'utilisation de solution saline comme liquide d'irrigation élimine presque totalement les risques d'hyponatrémie. L'utilisation de chlorure de sodium physiologique pour l'irrigation élimine pratiquement le risque de syndrome TUR (c'est-à-dire d'hyponatrémie), mais pas le risque d'absorption de liquides [237].

- **Moins de traumatisme thermique** : La température de résection étant plus basse, les dommages thermiques aux tissus adjacents sont réduits, ce qui diminue les risques de sténoses urétrales ou de lésions du col vésical.
- **Amélioration de la coagulation** : Les dispositifs bipolaires, tels que ceux de Cyrus et Storz, offrent une coagulation efficace avec des pertes sanguines similaires ou inférieures à celles observées en monopolaire.
- **Durée plus courte de cathétérisme** : Les études montrent que la RTUP bipolaire réduit le temps de cathétérisme postopératoire (2,8–3,8 jours contre 4 jours pour la monopolaire).

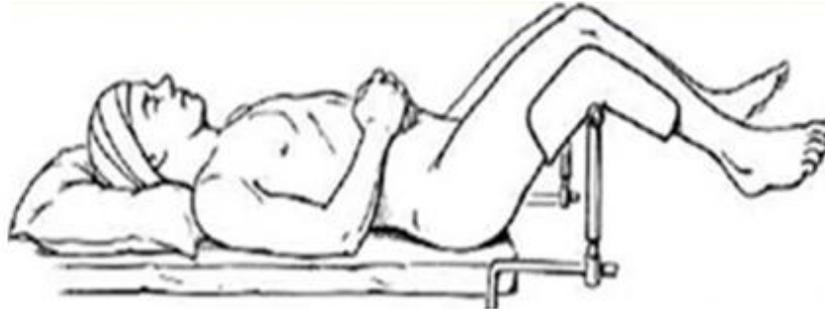
Cependant, certains inconvénients subsistent, notamment une initiation de coupe parfois plus lente et un taux légèrement plus élevé de sténoses urétrales observé dans certaines études comparatives.

L'équipement bipolaire peut être rare dans plusieurs parties du monde. Son intégration requiert une refonte intégrale des ensembles d'instruments urologiques et l'installation d'une unité de générateur électrochirurgical dédiée. Par ailleurs, il est généralement constaté qu'il présente une vitesse d'exécution légèrement inférieure à celle de la résection monopolaire, bien que les résultats globaux soient comparables.

#### **4. Techniques Chirurgicales de la Résection Transurétrale de la Prostate (RTUP) :**

Le patient est installé en position lithotomique modifiée (Figure 84), position préférée pour la RTUP, qui permet un accès optimal tout en minimisant les risques de lésions liées à la pression exercée sur les proéminences osseuses.

Des coussins de protection sont utilisés pour éviter les blessures dues à une hyperextension des articulations de la hanche.

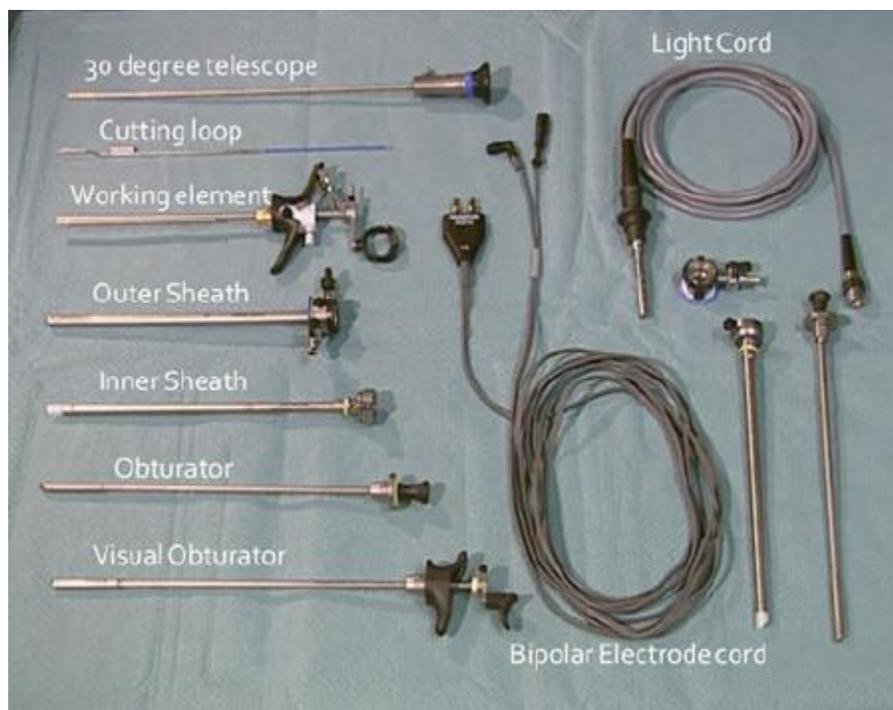


**Figure 84: Position lithotomique modifiée**

L'intervention débute par une cystoscopie diagnostique afin d'explorer l'urètre et le méat externe. Si une sténose urétrale sévère est détectée, une urétrotomie interne peut être pratiquée avant l'introduction du résectoscope. Ce dernier, souvent de type Iglesias à irrigation continue et d'un calibre de 26F, est l'instrument de choix pour cette procédure. La résection commence généralement à la position de 12 heures, au niveau de la commissure antérieure, et progresse jusqu'à ce que les fibres circulaires du col vésical et de la capsule prostatique soient visibles.

Les instruments nécessaires incluent :

- Un résectoscope de 26F de type Iglesias à irrigation continue.
- Un générateur électrochirurgical haute fréquence.
- Une anse de résection
- Une lentille à 30°
- Un cathéter à trois voies (18F ou 20F).



**Figure 85: Instruments nécessaires**

La résection commence généralement à la position de 12 heures, au niveau de la commissure antérieure, et progresse jusqu'à ce que les fibres circulaires du col vésical et de la capsule prostatique soient visibles.

Deux techniques principales de résection sont couramment utilisées (Figure 86):

- **Technique de Barnes** : La méthode de Barnes débute par l'ablation du lobe moyen à la position de 6 heures, s'étendant jusqu'au verumontanum. Cette intervention permet de former un sillon distinct dans le plancher de l'urètre prostatique. Les lobes droit et gauche sont traités séparément, un à la fois. La résection du lobe latéral droit commence à 6 heures et se poursuit dans le sens des aiguilles d'une montre jusqu'à 11 heures. De manière similaire, le

lobe gauche est abordé à partir de 6 heures, mais dans le sens inverse des aiguilles d'une montre jusqu'à 1 heure. S'il y a un grand lobe antérieur, celui-ci est résecté séparément du col de la vessie jusqu'au niveau du verumontanum. Dans le cas où le lobe antérieur n'est pas grand, cette bande de tissu peut être laissée intacte.

- **Technique de Nesbit** : La technique NESBIT est largement adoptée par les urologues pour réaliser la résection transurétrale de la prostate (RTUP). Fondée sur l'apport vasculaire à la prostate, cette méthode vise à minimiser les hémorragies au cours des premières étapes de la résection. Cette approche implique une résection le long de la capsule prostatique, la résection débute à 11 heures par la formation d'un sillon au niveau du col de la vessie, suivi d'une progression systématique le long de ce sillon vers l'apex, favorisant une énucléation des lobes latéraux. Les lobes dévascularisés tombent vers le sol et sont retirés avec facilité. Cette technique est particulièrement adaptée aux adénomes volumineux et s'aligne avec les principes modernes d'énucléation endoscopique.

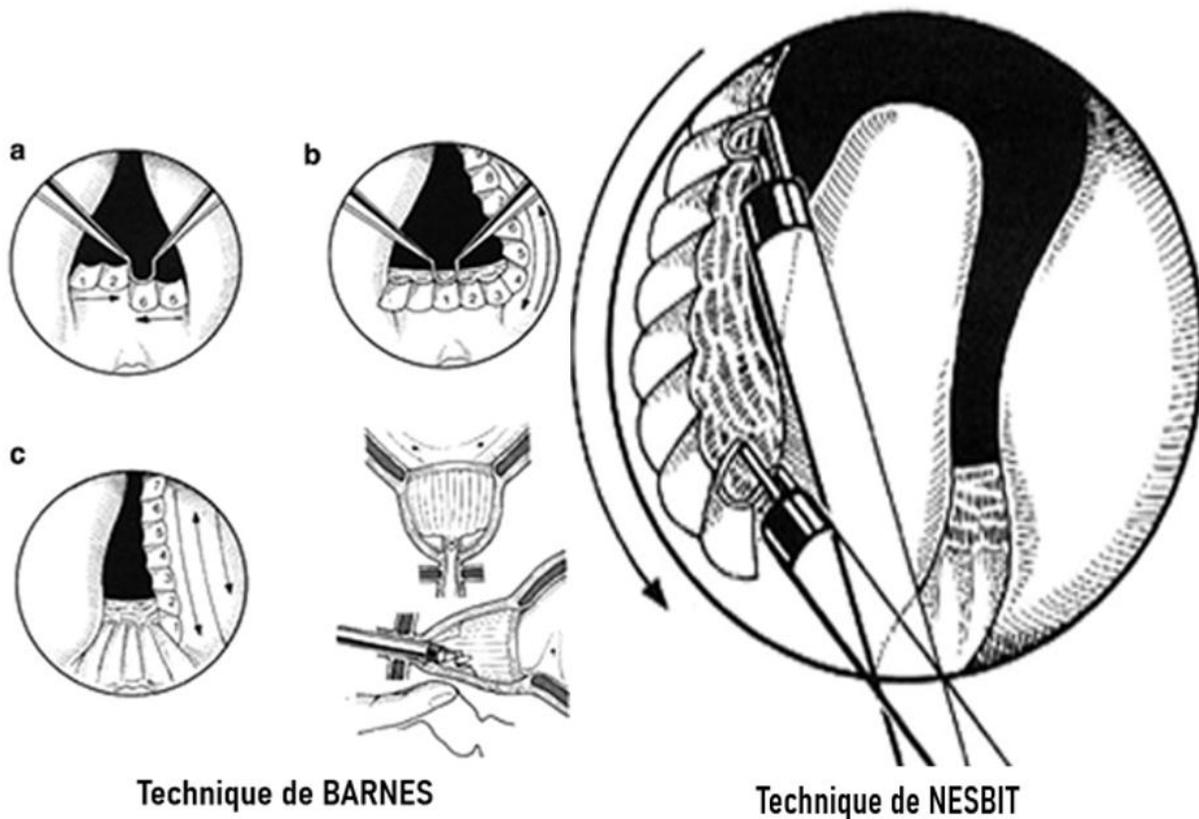
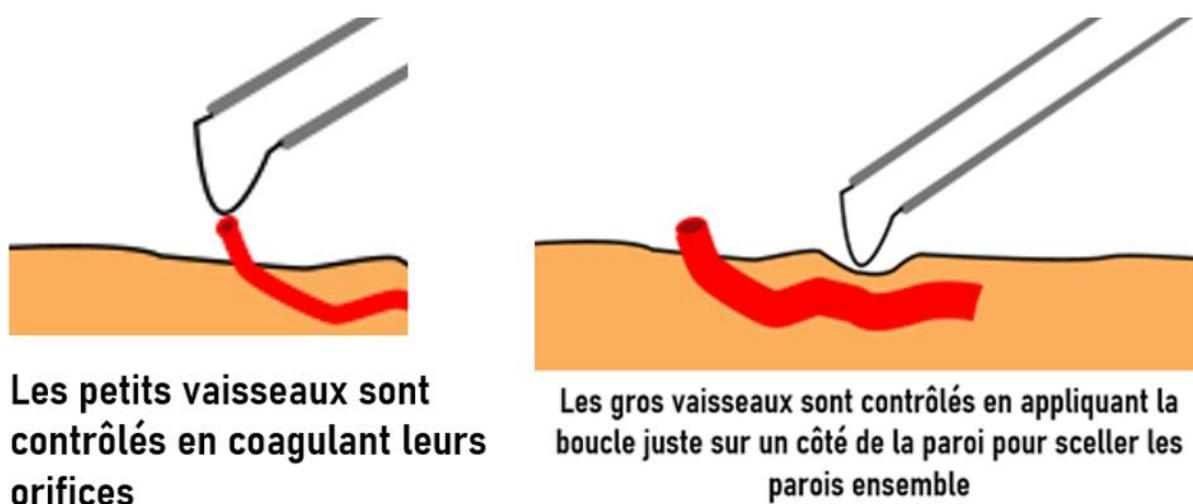


Figure 86:Les techniques de BARNES et de NESBIT

Afin de prévenir toute lésion du trigone, il est fondamental de ne pas effectuer une résection trop profonde au niveau du col vésical. Une attention particulière est également requise lors de la résection à la position de 12 heures, car les blessures du sphincter externe sont plus fréquentes à cet endroit.

Une fois la résection achevée, l'hémostase est réalisée par la coagulation des vaisseaux sanguins (Figure 87) au niveau de la capsule prostatique, particulièrement à 2, 10, 5 et 10 heures.



**Figure 87:Hémostase réalisée par coagulation des vaisseaux**

Ensuite, les fragments réséqués sont évacués, et un cathéter à trois voies est mis en place avec une irrigation saline continue. Ce cathéter est maintenu par une traction douce pour garantir sa stabilité et prévenir les saignements [238,239].

## **5. Résultats à Long Terme et Complications :**

### **5.1. Résultats à Long Terme :**

Depuis son introduction, la RTUP a démontré une efficacité durable, avec des taux de satisfaction élevés chez les patients, même plusieurs décennies après l'intervention. Par exemple, des études montrent que les taux de satisfaction à 15 ans atteignent 79% [240], avec des taux de réintervention relativement faibles, allant jusqu'à 8,3% sur une période de huit ans [241].

### **5.2. Complications :**

Les complications associées à la RTUP ont considérablement diminué au fil du temps. Alors que les premières séries rapportaient des taux de mortalité de 11 % dans les années 1930 [242], les études contemporaines montrent des taux de mortalité proches de 0 % à 0,3 %, comparables ou inférieurs à ceux d'autres techniques chirurgicales comme la vaporisation au laser ou l'énucléation

Le syndrome RTUP, complication de la RTUP monopolaire, résulte d'une absorption excessive du liquide d'irrigation hypotonique (glycine à 1,5% ou mannitol) utilisé pour la conduction du courant électrique, environ 20 mL de liquide est absorbé chaque minute, dont près d'un tiers pénètre directement dans le système veineux, entraînant une hyponatrémie par dilution (sodium sérique < 125 mmol/L).

Ce syndrome peut causer confusion, nausées, vomissements, hypertension, bradycardie, troubles visuels et, dans les cas sévères, un œdème pulmonaire ou cérébral. Grâce aux progrès techniques et à l'utilisation de

l'anesthésie rachidienne, l'incidence du syndrome TUR a été significativement réduite dans les séries récentes, tombant en dessous de 1,1%.

Parmi les complications possibles, on peut citer :

- Saignements
- Les extravasations par perforation capsulaire
- Les infections
- La rétention urinaire
- Plus rarement, l'incontinence ou les sténoses [243].

Le traitement du syndrome RTUP comprend l'arrêt immédiat de la chirurgie, une restriction hydrique stricte, l'administration de 20mg de furosémide en IV, et en cas de gravité, une perfusion de sérum hypertonique [243].

## **6. Incision Transurétrale de la Prostate (TUIP) :**

### **6.1. Aspects Techniques :**

L'incision transurétrale de la prostate (TUIP) constitue une alternative minimalement invasive à la résection transurétrale de la prostate (RTUP) pour le traitement de l'hyperplasie bénigne de la prostate (HBP), particulièrement chez les patients présentant des prostates de petite taille (<30 mL) sans lobe médian proéminent [244].

L'absence de prélèvement tissulaire pour analyse pathologique lors d'une TUIP nécessite une évaluation préopératoire rigoureuse incluant un dosage du PSA et un toucher rectal approfondi chez tous les patients, afin d'exclure un cancer de la prostate [245].

Cette technique repose sur l'utilisation d'un couteau électrique pour réaliser des incisions précises visant à réduire l'obstruction au niveau du col vésical tout en minimisant les risques de complications associées

### **6.2. Technique Chirurgicale :**

La TUIP consiste en une ou deux incisions réalisées depuis l'intérieur du col vésical jusqu'au verumontanum. Ces incisions doivent être effectuées avec précision jusqu'à atteindre la capsule prostatique, identifiable par la présence de tissu adipeux, indiquant la profondeur correcte de dissection. Les incisions sont généralement pratiquées aux positions 5 heures et 7 heures, bien qu'une incision unique à 6 heures puisse être envisagée pour réduire le risque d'éjaculation rétrograde. L'approche technique nécessite une attention particulière pour éviter toute lésion des structures voisines. L'utilisation d'un résectoscope permet une visualisation directe du champ opératoire, facilitant la réalisation d'incisions contrôlées. Une dissection soignée est essentielle pour prévenir des complications telles que les blessures des orifices urétéraux ou l'endommagement du trigone vésical [246]

### **6.3. Comparaison avec la RTUP :**

La TUIP se révèle être une alternative intéressante à la RTUP pour les patients présentant des prostatites de petite taille sans lobe médian proéminent. En effet, elle offre des résultats cliniques comparables en termes de réduction des symptômes (IPSS) et d'amélioration du débit urinaire (Q<sub>max</sub>), tout en présentant un profil de morbidité plus favorable. Notamment, l'incidence de l'éjaculation rétrograde est significativement plus faible avec la TUIP (18,2% vs

65,4% pour la RTUP), ce qui en fait une option privilégiée pour les patients jeunes ou soucieux de préserver leur fertilité [247].

La décision de privilégier la TUIP doit être prise au cas par cas, en pesant les avantages et les inconvénients de cette technique. En effet, si la TUIP permet une récupération plus rapide, elle est également associée à un taux de réintervention plus élevé. Le choix dépendra des préférences du patient, de son âge et de ses comorbidités [248].

#### **6.4. Avantages :**

La TUIP est associée à une durée opératoire plus courte et à une perte sanguine réduite par rapport à la RTUP, ce qui diminue le besoin de transfusions et les complications périopératoires. De plus, l'incidence de complications graves, telles que le syndrome TUR, est quasi inexistante avec la TUIP, contrairement à la RTUP monopolaire où ce syndrome, bien que rare (<1,1 %), reste une préoccupation clinique. La TUIP offre de meilleurs résultats pour la fonction éjaculatoire que la RTUP [249].

Bien que la TUIP et la RTUP soient comparables en ce qui concerne l'amélioration du débit urinaire, la TUIP présente l'avantage d'un temps d'intervention plus court et d'une incidence moindre de complications postopératoires ce qui en fait une option plus appropriée pour les prostates de moins de 35 grammes [250].

En conclusion, la TUIP représente une technique chirurgicale efficace et sûre pour les patients atteints d'HBP avec des prostates de petite taille. Sa simplicité technique, associée à un profil de complications réduit, en fait une

alternative précieuse à la RTUP dans des indications soigneusement sélectionnées [251].

## VI. Énucléation de la prostate au laser Holmium (HoLEP)

### 1. L'Histoire de l'HOLEP : Évolution et Contributions au Traitement de l'HBP :

Bien que la surveillance active et les traitements médicamenteux soient des options pour les LUTS non gênants, la chirurgie reste le traitement de référence surtout pour les formes modérées à sévères.[252]

L'émergence des technologies laser à la fin des années 1990 a entraîné une transformation majeure dans le traitement de l'hyperplasie bénigne de la prostate (HBP). Ces lasers interagissent avec les tissus humains par le biais de substances connues sous le nom de chromophores capables d'absorber les radiations électromagnétiques.

L'interaction d'un chromophore avec un laser induit une excitation moléculaire, ce qui permet la transformation de l'énergie électromagnétique en énergie thermique. Lorsque le tissu atteint une température **supérieure** à son point d'ébullition, il se vaporise. À l'inverse, si la température reste en dessous de ce point, cela conduit à la dénaturation des protéines, entraînant la **coagulation** et la **nécrose** du tissu.

Le laser Ho:YAG (Holmium:Yttrium–Aluminum–Garnet) émet à une longueur d'onde de **2100 nm**, utilisant l'eau comme chromophore. Le rayonnement laser est émis en mode pulsé avec une puissance de crête de plusieurs kilowatts. La combinaison de la longueur d'onde et des impulsions laser

de haute puissance et de courte durée permet d'atteindre une concentration d'énergie significative à chaque impulsion, ce qui provoque la création et l'effondrement de bulles de vapeur intenses durant la période de l'impulsion laser. Les bulles de vapeur engendrent des déchirures au sein du tissu prostatique, lesquelles sont exploitées dans diverses méthodes chirurgicales, telles que l'ablation, la résection et l'énucléation.

Actuellement, l'énucléation par laser Ho:YAG (HoLEP : Holmium Laser Enucleation of the Prostate) constitue l'application prédominante de cette technologie dans le traitement de l'hyperplasie bénigne de la prostate (HBP) [253]. Considérée comme une option thérapeutique de choix, L'énucléation de la prostate au laser holmium (HoLEP) est une alternative sûre et efficace à la prostatectomie ouverte pour les adénomes prostatiques volumineux, tout en étant généralement associée à une morbidité périopératoire significativement plus faible [254]. Les premières applications du laser Ho:YAG en urologie [255] ont été limitées à cause de leur faible pouvoir hémostatique par rapport aux autres lasers, ainsi que par la qualité du tissu réséqué pour le diagnostic histologique. C'est en développant la technique de HoLRP (Holmium Laser Resection of the Prostate) que Gilling et al. ont posé les bases de l'énucléation prostatique au laser [256], aujourd'hui connue sous le nom de HoLEP.

L'HoLEP offre des avantages significatifs par rapport à la RTUP dans le traitement de l'hyperplasie bénigne de la prostate. Elle permet un soulagement plus efficace de l'obstruction urinaire, associé à une récupération postopératoire plus rapide, notamment en termes de retrait de la sonde et de durée

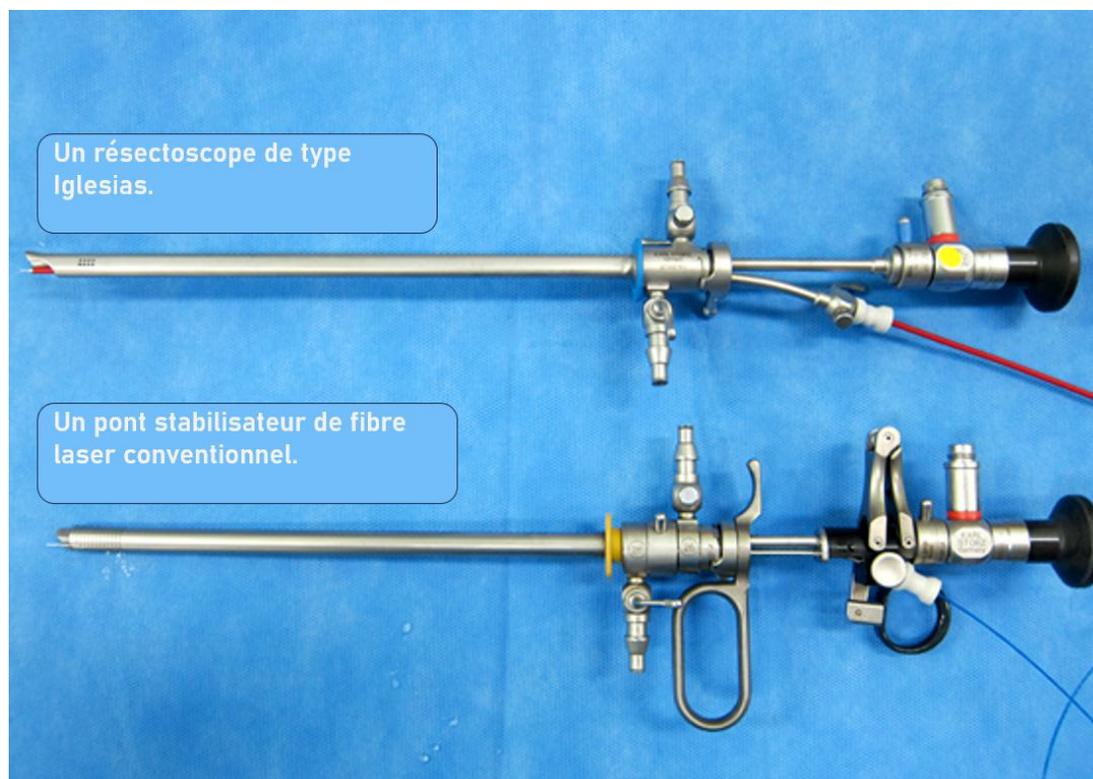
d'hospitalisation. Bien que son temps d'exécution soit plus long, l'HoLEP permet d'enlever un volume de tissu prostatique plus important, assurant une efficacité à long terme [257]. En plus, il a été démontré que l'HoLEP permet de traiter efficacement l'hyperplasie bénigne de la prostate, même chez des patients à haut risque (maladies cardiovasculaires, immunosuppression, troubles de la coagulation) qui ne sont pas éligibles à une RTUP. Cette technique constitue ainsi une solution thérapeutique adaptée à une population de patients particulièrement vulnérable [258].

Le HoLEP offre une amélioration durable des symptômes, tant à court qu'à long terme, avec un profil de sécurité favorable. Cette technique se caractérise par une faible morbidité, des durées d'hospitalisation réduites et un faible taux de complications, y compris à distance. Cette technique est de plus en plus utilisée pour traiter l'HBP, quelle que soit la taille de la prostate [259].

## **2. Techniques de l'HoLEP :**

### **2.1. Introduction :**

La technique de l'énucléation de la prostate au laser Holmium (HoLEP) a été perfectionnée au fil du temps pour s'adapter aux différentes anatomies prostatiques et maximiser les résultats chirurgicaux. Elle peut être réalisée en 2, 3 lobes ou en un seul bloc. Après incision de la muqueuse urétrale, le chirurgien dissèque délicatement l'adénome de la capsule prostatique en utilisant le laser pour coaguler les vaisseaux et faciliter la dissection.



**Figure 88:Matériel utilisé dans l'HOLEP.**

L'énucléation complète des lobes prostatiques permet leur extraction en bloc puis leur fragmentation dans la vessie à l'aide d'un morcellateur. Cette technique réduit considérablement le temps opératoire, en permettant d'enlever plus de 1 gramme de tissu par minute dans les cas de prostatites volumineuses [260].

L'HoLEP requiert généralement un laser holmium de 60 à 100 W, utilisé avec des paramètres typiques de 2 à 2,4 J et 25 à 50 Hz.[261]. En comparaison avec la technique de référence des trois lobes, les méthodes d'énucléation en bloc et à deux lobes permettent de réduire significativement le temps d'énucléation et la durée totale de l'intervention, tout en conservant des résultats fonctionnels postopératoires similaires [262].

## 2.2. Technique Classique en Trois Lobes :

La technique en trois lobes est l'approche classique de l'HoLEP, initialement introduite par Gilling en 1998. Elle repose sur une énucléation séquentielle des trois lobes prostatiques (médian et latéraux) par des incisions longitudinales s'étendant de l'apex au col vésical. Cette technique pionnière a permis de poser les bases de l'HoLEP moderne, en intégrant l'utilisation du morcellateur [263].

### Étapes principales :

Incisions initiales : Avant toute incision au niveau du col vésical, il est impératif d'identifier les méats urétéraux et d'évaluer leur distance par rapport au col. Les incisions seront réalisées légèrement en dehors de l'axe des méats pour éviter tout risque de lésion urétérale.

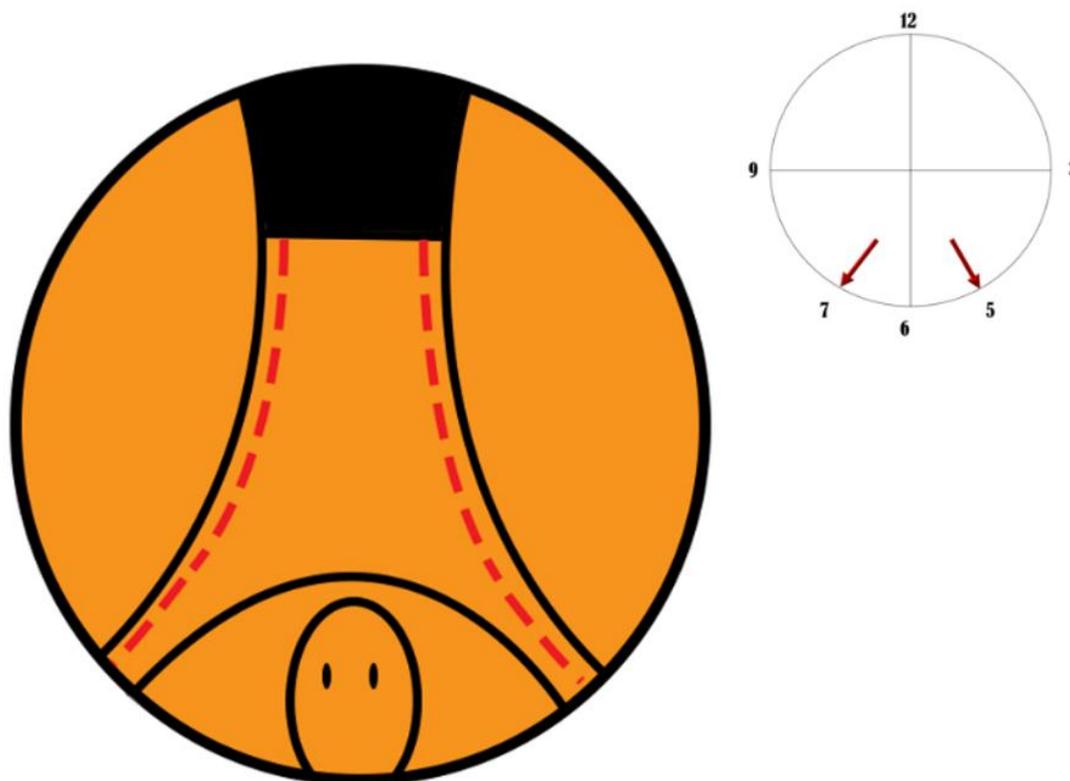
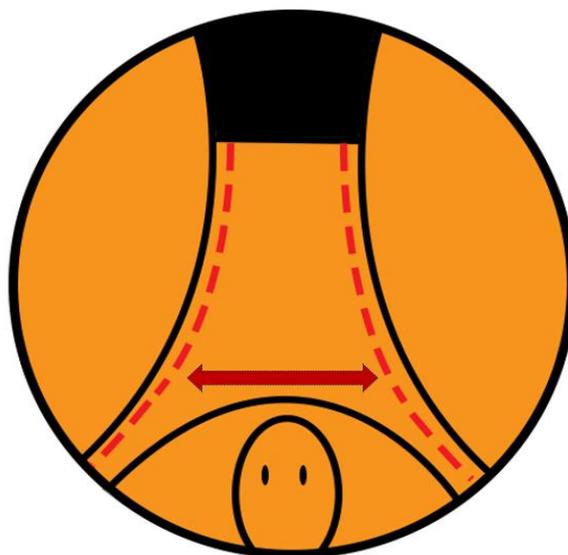


Figure 89:Incisions au niveau de l'urètre à 5 heures et 7 heures.

La procédure commence par des incisions au niveau de l'urètre à 5 et 7 heures La profondeur de l'incision doit être restreinte à la capsule prostatique et étendues vers le veru montanum, isolant ainsi le lobe médian (Figure 89).

**Dissection du lobe médian :** Après avoir effectué les deux incisions latérales jusqu'au veru montanum, une incision horizontale transversale est réalisée en amont de ce repère anatomique (Figure 90). Cette manœuvre permet d'établir une communication entre les deux tranchées et d'exposer le plan capsulaire prostatique.

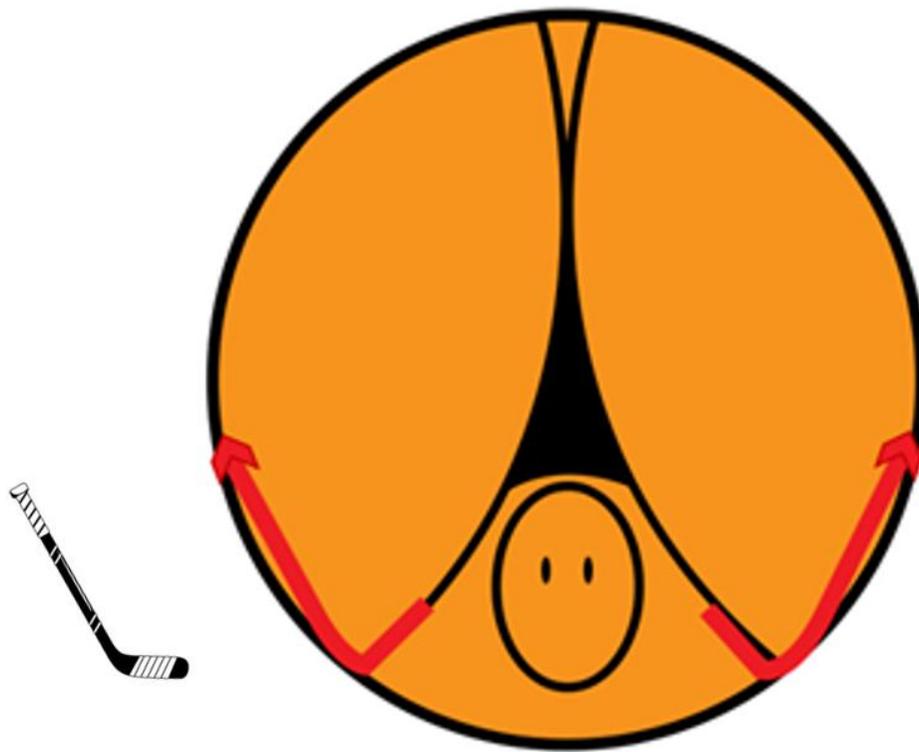
L'énucléation du lobe médian est ensuite réalisée par dissection rétrograde, alternant l'utilisation d'instruments mécaniques et de l'énergie laser. Le lobe médian est ensuite disséqué de manière rétrograde. L'instrument sera redressé progressivement en épousant la courbure postérieure de la loge prostatique, ce qui permettra d'éviter une dissection sous-trigonale. Une fois que l'on aura atteint le col vésical, le lobe médian sera isolé en formant un pédicule, ce qui permettra une manipulation plus aisée et réduira le risque de lésion des orifices urétéraux. Afin d'éviter une extension intempestive de la dissection dans la vessie, l'instrument est arrêté au niveau du col vésical. Le lobe médian est alors délicatement repoussé à l'aide du bec de l'instrument pour tendre les fibres, facilitant ainsi leur section nette au niveau du col.



**Figure 90:Incision Horizontale**

#### **Énucléation des lobes latéraux :**

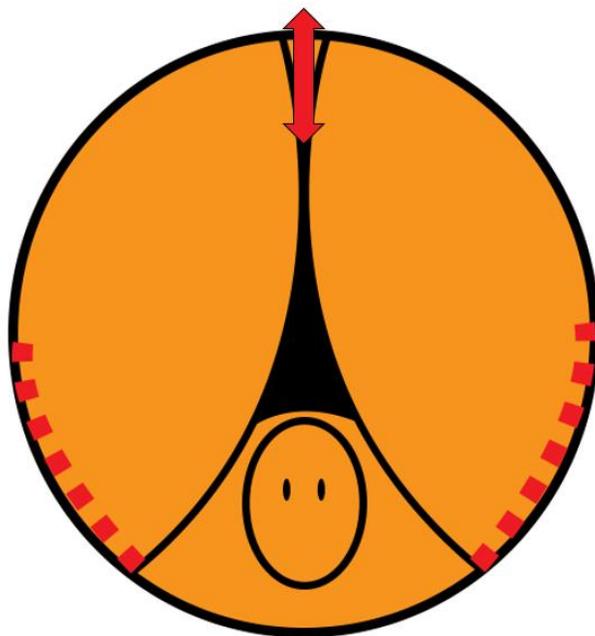
Il est recommandé d'effectuer une énucléation complète d'un lobe à la fois. Après l'énucléation du lobe médian, le résecteur est retiré jusqu'au veru montanum pour identifier le sphincter strié. L'apex du lobe latéral est repéré comme point de départ. La puissance laser est ajustée pour préserver le sphincter. Une incision de 1 cm est pratiquée jusqu'à la capsule, puis une rotation de l'instrument permet d'énucléer le lobe latéral jusqu'aux positions 3 et 9 heures, correspondant à un mouvement connu sous le nom de « crosse de hockey » (Figure 91).



**Figure 91:Énucléation ascendante des deux lobes latéraux en crosse de hockey.**

Une fois que le plan d'énucléation est lancé, l'alternance entre l'énergie mécanique et le laser permet d'effectuer une dissection rétrograde du lobe latéral. Par la suite, une tranchée à 12 heures est créée pour séparer les deux lobes (Figure 92). Pour ce faire, le résecteur est positionné au-dessus du

verumontanum, et un mouvement de 180 degrés est exécuté, tout en maintenant le résecteur avec la main non dominante pour éviter tout mouvement de recul.



**Figure 92:Incision à 12 heures pour séparer les deux lobes latéraux.**

L'instrument est incliné vers le haut pour marquer la limite de l'urètre prostatique afin d'éviter tout traumatisme du sphincter strié lors de l'incision à « midi ». Cette marque se réalise avec un mouvement d'essuie-glace, permettant de débiter l'énucléation des deux lobes latéraux.

Ensuite, une incision est réalisée à « 12 heures » au niveau du col, jusqu'à visualiser les fibres circulaires en profondeur. Une fois cette étape terminée, on progresse depuis le col vers 1 heure pour le lobe gauche, et 11 heures pour le

lobe droit, en détachant progressivement le lobe latéral dans le plan de la capsule (Figure 93). Le lobe descend alors progressivement.

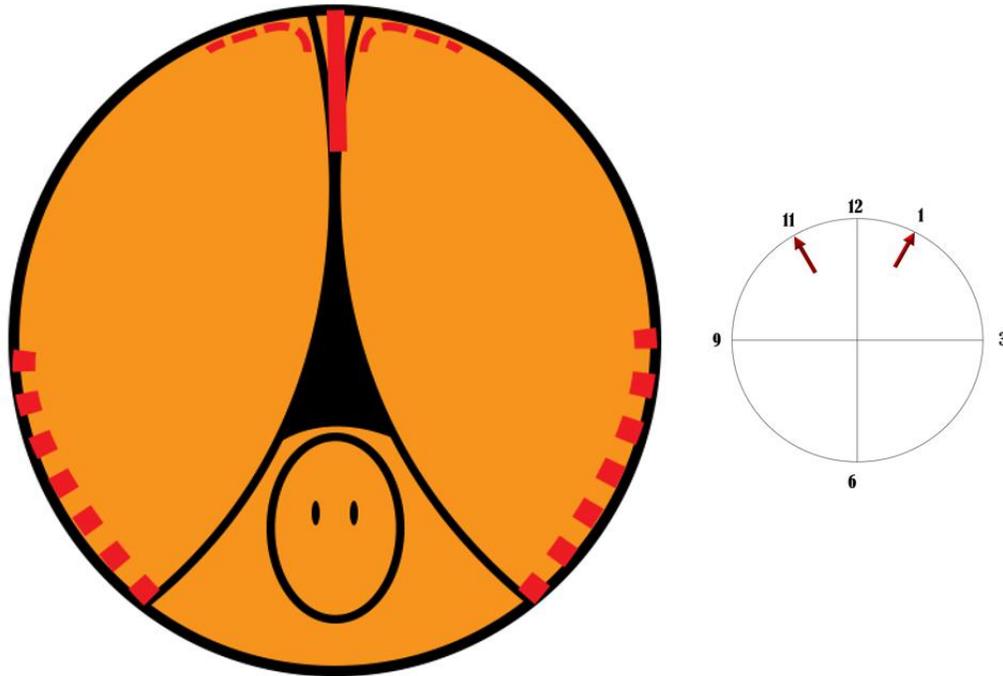
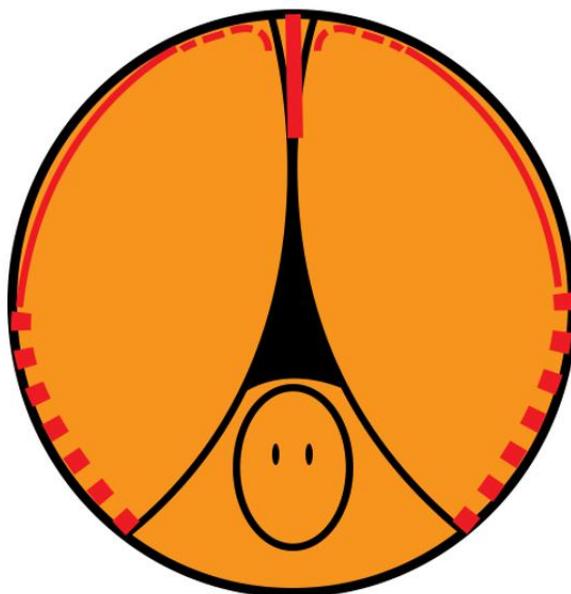


Figure 93: Détachement des lobes latéraux à partir du col vers 1 heure pour le lobe gauche, et 11 heures pour le lobe droit.

En poursuivant ce geste distalement, tout en restant à la partie supérieure du lobe, on rejoint la limite de l'urètre prostatique. Une rotation de haut en bas est effectuée pour retrouver la « crosse de hockey » à « 3 heures » pour le lobe gauche et à « 9 heures » pour le droit (Figure 94). Ces points latéraux de la capsule étant des zones fragiles, une attention particulière est nécessaire pour éviter toute perforation.



**Figure 94: Achèvement de l'énucléation des lobes latéraux en rejoignant la crosse de hockey.**

Une fois la jonction réalisée, l'instrument est replacé à l'apex, et l'énucléation rétrograde du lobe latéral peut commencer, en alternant les énergies laser et mécaniques. Arrivé au col, il est crucial de ne pas entrer dans la vessie pour éviter de blesser les méats urétéraux ou de décoller la muqueuse vésicale.

La même technique est appliquée pour le lobe controlatéral. Si un lobe ne se détache pas complètement dans la vessie, cela peut être dû à des ponts

muqueux antéro-apicaux. Dans ce cas, l'instrument est retourné à 180° au niveau du verumontanum, et ces ponts sont incisés tout en repoussant le lobe vers la vessie, afin de préserver les sphincters striés [261,264].

### **2.3. Technique Modifiée en Deux Lobes :**

#### **2.3.1. Technique :**

La technique des deux lobes représente une évolution naturelle et raffinée de la méthode classique à trois lobes dans l'énucléation au laser holmium de la prostate (HoLEP). Cette approche vise à optimiser l'efficacité chirurgicale tout en réduisant le temps opératoire à travers une simplification des incisions, nécessitant **une seule incision postérieure** réalisée soit à la position de 5 ou de 7 heures, selon la configuration anatomique de la prostate et les préférences du chirurgien. Cette incision unique est effectuée dans un sens proximal-distal, jusqu'au niveau du veru montanum. Contrairement à la méthode classique à trois lobes, cette technique divise l'adénome prostatique en deux parties :

- Un lobe latéral d'un côté
- Une masse combinée du lobe médian avec le lobe latéral controlatéral.

L'incision à 12 heures, similaire à celle de la technique classique, est ensuite connectée aux incisions postérieures de chaque côté. Une fois les connexions établies, l'énucléation est réalisée, suivie par la morcellation des tissus excisés.

Cette approche permet de réduire le nombre d'incisions nécessaires, ce qui contribue à diminuer la durée de l'intervention tout en maintenant un résultat fonctionnel équivalent à celui des autres techniques.

### **2.3.2. Avantages et Limitations :**

L'un des principaux avantages de la technique des deux lobes est la réduction du temps opératoire, en particulier au niveau de l'étape d'énucléation. Une étude prospective a montré que cette technique permet une réduction du temps d'énucléation d'environ 20 % par rapport à la méthode à trois lobes, sans compromettre les résultats fonctionnels postopératoires.

De plus, en limitant les incisions postérieures à une seule, cette technique peut minimiser les risques de complications liées à des dissections excessives ou à une manipulation prolongée des tissus.

Cependant, cette méthode présente également des défis, notamment une complexité accrue dans l'identification du plan chirurgical entre l'adénome et la capsule prostatique. Cette difficulté est particulièrement significative pour les chirurgiens moins expérimentés, rendant la technique des deux lobes plus adaptée aux praticiens ayant une expertise avancée en HoLEP.

### **2.4. Technique en Bloc :**

L'énucléation en bloc débute par une incision longitudinale à l'apex du lobe gauche, juste latéralement au veru montanum, respectant le plan de clivage naturel entre l'adénome et la capsule prostatique. Ce plan de clivage capsulaire est particulièrement distinct en raison de sa proéminence à cet endroit, où la quantité de tissu est faible et indépendante de la taille de l'adénome. Cette

caractéristique anatomique facilite grandement l'identification du plan de dissection, permettant ainsi un début d'énucléation rapide et sûr. Une seule incision rétrogradée suffit à énucléer l'ensemble de l'adénome, réduisant ainsi les risques de lésions collatérales et simplifiant la procédure chirurgicale.

L'énucléation complète du lobe gauche commence par une dissection de l'apex vers le col vésical, en remontant cranialement en balayant de 5 à 3 heures, puis de 3 à 12 heures jusqu'au col vésical. L'incision traditionnelle à 12 heures peut entraîner des complications telles que des saignements ou de l'incontinence urinaire si elle est mal réalisée. Pour éviter cela, l'énucléation se poursuit directement vers le côté droit, de 12 à 9 heures, en maintenant un bon plan de dissection. Cette méthode permet d'isoler facilement la partie crâniale du lobe droit.

L'énucléation se poursuit en revenant à l'incision apicale gauche, où la muqueuse est incisée horizontalement au-dessus du veru montanum, atteignant l'apex du lobe droit. Le lobe médian, déjà séparé du lobe gauche, est relié au lobe droit. Après avoir incisé la muqueuse dans la fente du côté droit du veru montanum, l'énucléation des lobes médian et droit est effectuée de 5 à 9 heures, rejoignant la partie supérieure déjà détachée et le col vésical. Cela permet d'obtenir un adénome en forme de fer à cheval, avec les lobes médian et droit d'un côté et gauche de l'autre, connectés par la commissure antérieure. Cette méthode assure que l'adénome reste correctement orienté dans la fosse prostatique, évitant sa mobilité excessive et la rotation des lobes pendant l'énucléation.

L'adénome complètement énucléé n'est encore attaché que par une bande muqueuse antérieure entre 10 et 2 hr. Deux incisions ciblées permettent de le libérer complètement :

1. **Incisions obliques** : Réalisées sur les lobes latéraux à 10 h et 2 h, à au moins 1 cm du sphincter externe, elles convergent vers 12 h pour préserver un lambeau muqueux résiduel.
2. **Incision horizontale finale** : Réalisée à 12 h, en étirant légèrement la muqueuse pour l'éloigner du sphincter, le plus proche possible du col de la vessie.

Une fois ces incisions effectuées, l'adénome est totalement libéré et poussé dans la vessie pour être morcelé [265].

#### **2.5. Technique en Bloc Sans Contact :**

Contrairement à la technique classique qui consiste à appliquer le laser directement sur les tissus, cette approche exploite l'effet de la bulle de plasma générée autour de la fibre laser. L'endoscope est utilisé pour soulever délicatement le lobe prostatique, créant ainsi un angle diédral qui permet d'exposer progressivement le plan capsulaire. Les fibres conjonctives, mises sous tension, sont alors vaporisées de manière contrôlée, sans contact direct avec la capsule prostatique.

Contrairement à l'énucléation en-bloc où le laser entre en contact direct avec la prostate, la méthode sans contact exploite l'énergie du laser pour générer des bulles de plasma à distance des tissus.

Cette approche permet une coagulation et une vaporisation précises, réduisant significativement l'impact thermique sur les tissus adjacents, notamment la capsule prostatique. Cette préservation tissulaire contribue à limiter les risques de dysurie postopératoire et favorise une récupération plus rapide [265,266].

## **2.6. Techniques Spécialisées : Préservation du Col Vésical « Bladder Neck Sparing » :**

### **2.6.1. Description de la Technique :**

Les techniques de préservation du col vésical représentent une avancée significative dans l'énucléation au laser holmium de la prostate (HoLEP), particulièrement pour les patients jeunes et sexuellement actifs.

Cette technique vise à préserver l'intégrité anatomique et fonctionnelle du col vésical ainsi que du sphincter urétral interne lors du traitement de l'HBP, réduisant ainsi les risques de complications post-opératoires, notamment l'éjaculation rétrograde, un effet secondaire fréquent de la procédure, tout en maintenant des résultats fonctionnels satisfaisants.

Cette approche présente plusieurs bénéfices. En limitant l'énergie transmise directement à la capsule, elle diminue le risque de complications post-opératoires, telles que la dysurie causée par une irritation thermique. De plus, le respect optimal de l'anatomie prostatique contribue à réduire les taux d'incontinence urinaire transitoire et à améliorer globalement les résultats fonctionnels. [265,266]

La préservation du col vésical est réalisable avec toutes les variantes de l'HoLEP, qu'il s'agisse de la technique classique à trois lobes, modifiée à deux lobes ou en bloc. Cette approche consiste à éviter toute incision directe des fibres du col vésical. L'énucléation se fait en respectant l'intégrité de ces fibres, en progressant de manière distale vers proximale jusqu'à la libération complète de l'adénome dans la vessie. Une identification précise des fibres du col vésical est primordiale pour garantir le succès de cette technique.

### **2.6.2. Résultats et Avantages :**

- 1. Réduction de l'éjaculation rétrograde :** Contrairement aux techniques traditionnelles comme la résection transurétrale de la prostate (TURP), où le col vésical est souvent endommagé, cette technique permet de maintenir la pression physiologique nécessaire pour une éjaculation antérograde normale. Dans cette étude, seulement 11,7 % des patients ont présenté une éjaculation rétrograde après la procédure, contre 60 à 80 % dans les techniques classiques.
- 2. Préservation de la fonction urinaire :** En maintenant l'intégrité anatomique du col vésical et du sphincter interne, cette technique contribue à une meilleure continence urinaire post-opératoire. Aucun cas de contracture du col vésical n'a été observé dans la même étude, et les taux d'incontinence urinaire sévère étaient négligeables (0,6 % à 12 mois).
- 3. Amélioration de la qualité de vie :** La technique permet de réduire les complications liées à l'irritation des voies urinaires et de préserver la confiance des patients dans leur fonction sexuelle et urinaire. Cela se

traduit par une amélioration des scores de qualité de vie (QoL) et de satisfaction post-opératoire.

### **2.6.3. Limitations :**

Bien que prometteuses, les techniques de préservation du col vésical nécessitent une expertise chirurgicale avancée. L'identification des fibres du col vésical peut être techniquement exigeante en particulier chez les patients présentant une hypertrophie prostatique importante ou une anatomie complexe. De plus, les implications à long terme de cette approche, notamment en termes de durabilité des résultats et de complications potentielles, nécessitent des études supplémentaires [266,267].

## **3. Morcellation des Tissus :**

La morcellation, une étape essentielle de l'HoLEP, consiste à fragmenter le tissu prostatique énucléé.

Les morcellateurs jouent un rôle crucial dans la procédure de l'énucléation au laser Holmium de la prostate (HoLEP), ils permettent de fragmenter et d'extraire les tissus prostatiques au niveau de la vessie. Deux morcellateurs principaux sont actuellement disponibles aux États-Unis :

- Le VersaCut de Lumenis :



Figure 95:Le morcellateur VersaCut de Lumenis

- Le Piranha de Wolf :



Figure 96:Le morcellateur PIRANHA

Le VersaCut utilise des lames à mouvement **alternatif (ou réciproque)**, contrôlées par une pédale, et offre un mécanisme d'aspiration continue, que la morcellation soit en cours ou non. Le Piranha, en revanche, dispose de lames à mouvement **oscillant** qui tournent à une vitesse sélectionnée, ainsi que d'un mécanisme d'aspiration en **micro-rafales** plutôt qu'en flux continu.

Bien que les deux dispositifs offrent des résultats similaires en termes de performance globale, le Piranha est souvent préféré par les chirurgiens pratiquant la HoLEP. Cela s'explique par son **coût d'utilisation inférieur**, son **taux de morcellation plus élevé**, en plus de sa conception ergonomique qui facilite son utilisation. De plus, son **courbe d'apprentissage est négligeable**, ce qui le rend accessible même aux utilisateurs moins expérimentés. Ces caractéristiques font du Piranha un outil plus efficace et sûr pour la morcellation des tissus prostatiques, contribuant ainsi à améliorer l'efficacité globale de la procédure HoLEP [268].

#### **4. Résultats Cliniques, Rentabilité, Complications et Adoption :**

##### **4.1. Avantages Cliniques et Résultats de l'HoLEP :**

L'énucléation laser de la prostate au holmium (HoLEP) est devenue une approche chirurgicale de référence pour le traitement de l'hyperplasie bénigne de la prostate (HBP) et des symptômes du bas appareil urinaire (LUTS). En tant qu'alternative moderne à la résection transurétrale de la prostate (RTUP) et à la prostatectomie ouverte, l'HoLEP se distingue par **son efficacité clinique, sa durabilité, sa rentabilité et son profil de complications réduit**.

Un des bénéfices notables de l'HoLEP réside dans son profil de complications plus favorable que celui d'autres approches chirurgicales. Les complications survenant pendant l'opération, telles que les perforations capsulaires et les dommages à la vessie, sont rares et, en général, peu graves.[269]

Par ailleurs, l'utilisation de solution saline comme fluide d'irrigation diminue le risque de syndrome de réabsorption de liquide (syndrome TUR), une complication fréquemment observée lors de la résection transurétrale de la prostate [270].

#### **4.2. Complications :**

Les complications postopératoires, telles que l'incontinence urinaire (à la fois d'effort et par impériosité), sont également rares. Bien que ces symptômes puissent survenir dans la période initiale après la chirurgie, ils diminuent significativement après trois mois de suivi, avec des taux résiduels d'incontinence d'effort autour de 0,5 % après un an. Les infections urinaires et les sténoses urétrales sont également signalées à des taux inférieurs à ceux observés avec la RTUP ou la prostatectomie ouverte [271].

La technique de l'HoLEP présente des résultats fiables et constants quel que soit le volume de la prostate, tout en étant peu affectée par la dimension de celle-ci. Il convient de souligner que le risque de transfusion sanguine est plus élevé chez les patients ayant des prostates très volumineuses, tandis que ceux avec de petites glandes courent un risque plus important de rétention urinaire aiguë transitoire [272].

### **4.3. Rentabilité :**

L'HoLEP est également une option rentable par rapport à la RTUP et à la prostatectomie ouverte. Bien que les coûts initiaux liés à l'acquisition du laser et du morcellateur soient élevés, ces dépenses sont compensées par plusieurs facteurs :

- Une durée d'hospitalisation réduite.
- Des temps de cathétérisation plus courts.
- Une diminution des complications post-opératoires nécessitant des soins supplémentaires [269].

Les analyses économiques indiquent que l'HoLEP est plus économique que la prostatectomie ouverte, affichant des coûts de 2919 \$ contre 3556 \$. Cette différence est principalement due à la diminution des durées d'hospitalisation [273].

## **5. Conclusion :**

En raison de ses avantages significatifs et de ses excellents résultats cliniques, l'HoLEP est aujourd'hui considérée comme le nouveau standard pour le traitement chirurgical de l'HBP, offrant une alternative efficace à la TURP et à la prostatectomie ouverte pour des prostates de toutes tailles. L'évolution de cette technique continue, avec l'objectif d'améliorer encore plus la sécurité et l'accessibilité de la procédure pour les praticiens et leurs patients.

# RESUMES

## **RESUME**

La prostate, organe vital dans le système reproducteur masculin, est le siège de nombreuses affections médicales, dont le cancer de la prostate, l'hyperplasie bénigne de la prostate, et d'autres pathologies urologiques. La compréhension précise de l'anatomie chirurgicale de cet organe est un pilier fondamental dans la planification et l'exécution des interventions chirurgicales, telles que la prostatectomie radicale, la chirurgie de résection transurétrale de la prostate (RTUP), et d'autres techniques.

De plus, la connaissance avancée de l'anatomie chirurgicale de la prostate a été un catalyseur pour le développement de nouvelles méthodes chirurgicales innovantes, et a permis d'explorer des approches moins invasives, d'améliorer la préservation des tissus sains, et d'accroître l'efficacité des interventions chirurgicales.

L'objectif central de ce travail de recherche est de synthétiser les connaissances existantes sur l'anatomie chirurgicale de la prostate, tout en évaluant et décrivant de manière approfondie les techniques chirurgicales qui sont actuellement utilisées pour traiter les pathologies de la prostate.

En rassemblant et en intégrant les données les plus récentes issues de la littérature scientifique et médicale, cette étude vise à offrir une compréhension complète de l'anatomie de la prostate dans le contexte des procédures chirurgicales, tout en mettant en évidence les meilleures pratiques et les avancées actuelles dans ce domaine crucial de la médecine urologique.

## **ABSTRACT**

The prostate, a vital organ in the male reproductive system, is the site of numerous medical conditions, including prostate cancer, benign prostatic hyperplasia, and other urological pathologies. A precise understanding of the surgical anatomy of this organ is a fundamental cornerstone in the planning and execution of surgical interventions such as radical prostatectomy, transurethral resection of the prostate (TURP), and other techniques.

Furthermore, advanced knowledge of the surgical anatomy of the prostate has been a driving force behind the development of innovative surgical methods. It has enabled the exploration of less invasive approaches, improved preservation of healthy tissues, and enhanced the efficacy of surgical procedures.

The central objective of this research work is to synthesize existing knowledge on the surgical anatomy of the prostate while thoroughly evaluating and describing the surgical techniques currently used to treat prostate pathologies.

By compiling and integrating the latest data from scientific and medical literature, this study aims to provide a comprehensive understanding of prostate anatomy in the context of surgical procedures. It also highlights best practices and current advancements in this critical area of urology.

## المخلص

تُعدّ البروستاتا عضوًا حيويًا في الجهاز التناسلي الذكري، وهي معرضة للإصابة بالعديد من الحالات الطبية، بما في ذلك سرطان البروستاتا، وفرط التنسج الحميد للبروستاتا، وأمراض بولية أخرى. يُعدّ الفهم الدقيق للتشريح الجراحي لهذا العضو أساسًا مهمًا لتخطيط وتنفيذ التدخلات الجراحية، مثل استئصال البروستاتا الجذري، واستئصال البروستاتا عبر الإحليل، وغيرها من التقنيات الجراحية.

إضافةً إلى ذلك، ساهمت المعرفة المتقدمة بالتشريح الجراحي للبروستاتا في تطوير أساليب جراحية مبتكرة، ما أتاح استكشاف طرق أقل توغلاً، وتحسين الحفاظ على الأنسجة السليمة، وزيادة فعالية العمليات الجراحية.

يهدف هذا البحث إلى تجميع المعرفة الحالية حول التشريح الجراحي للبروستاتا، مع تقييم ووصف شامل للتقنيات الجراحية المستخدمة حاليًا لعلاج أمراض البروستاتا.

من خلال جمع وتحليل أحدث البيانات المستخلصة من الأدبيات العلمية والطبية، تسعى هذه الدراسة إلى تقديم فهم متكامل لتشريح البروستاتا ضمن سياق العمليات الجراحية، مع تسليط الضوء على أفضل الممارسات والتطورات الحالية في هذا المجال الحيوي من طب المسالك البولية.

# REFERENCES

1. Kirby RS. Anatomy and Pathophysiology of the Prostate Gland. In: Garraway M, éditeur. Epidemiology of Prostate Disease [Internet]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 1995 [cité 14 juill 2024]. p. 3-12. Disponible sur: [http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-78826-0\\_1](http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-78826-0_1)
2. McNeal JE. Anatomy of the prostate: An historical survey of divergent views. *The Prostate*. janv 1980;1(1):3-13.
3. Bay NSY, Bay BH. Greek anatomist herophilus: the father of anatomy. *Anat Cell Biol*. 2010;43(4):280.
4. Josef Marx F, Karenberg A. History of the Term Prostate. *The Prostate*. févr 2009;69(2):208-13.
5. Androutsos G. L'urologie dans les planches anatomiques d'André Vésale (1514-1564). *Progrès en*
6. Giandomenico P. The prostate: History, Morphology, Functional Anatomy. Disponible sur: [https://www.fisiocritici.it/images/pdf/Volumi/2019.02/The\\_prostate\\_History\\_Morphology\\_Functional\\_Anatomy.pdf](https://www.fisiocritici.it/images/pdf/Volumi/2019.02/The_prostate_History_Morphology_Functional_Anatomy.pdf)
7. Walsh PC, Lepor H, Eggleston JD: Radical prostatectomy with preservation of sexual function: Anatomical and pathological considerations. *Prostate* 1983; 4: 473-85
8. Massa N. *Liber Introductorius anatomiae*. Venice: Francisci Bindoni; 1536. p. 29-34.

9. Garrison DH, Hast MH. A. Vesalius. The Fabric of the Human Body. An Annotated Translation of the 1543 and 1555 Editions of De Humani corporis fabrica libri septem. Basel: S. Karger; 2014. p. 1037–1064.
10. Sebe P, Schwentner C, Oswald J, Radmayr C, Bartsch G, Fritsch H. Fetal development of striated and smooth muscle sphincters of the male urethra from a common primordium and modifications due to the development of the prostate: an anatomic and histologic study. The Prostate. mars 2005;62(4):388–93.
11. 2. Beaudoin S, Robert R. L'embryologie pelvi-périnéale chez l'homme. In: Les incontinenances urinaires de l'homme [Internet]. Paris: Springer Paris; 2011 [cité 29 juill 2024]. p. 3–10. Disponible sur: [http://link.springer.com/10.1007/978-2-287-99160-8\\_1](http://link.springer.com/10.1007/978-2-287-99160-8_1)
12. Van Der Werff JFA, Nievelstein RAJ, Brands E, Luijsterburg AJM, Vermeij-Keers C. Normal development of the male anterior urethra. Teratology. mars 2000;61(3):172–83.
13. Timms BG. Prostate development: a historical perspective. Differentiation. juill 2008;76(6):565–77.
14. Francis JC, Swain A. Prostate Organogenesis. Cold Spring Harb Perspect Med. juill 2018;8(7):a030353.
15. Aaron L, Franco OE, Hayward SW. Review of Prostate Anatomy and Embryology and the Etiology of Benign Prostatic Hyperplasia. Urologic Clinics of North America. août 2016;43(3):279–88.

16. Thomas DM. The embryology of persistent cloaca and urogenital sinus malformations. *Asian J Androl.* 2020;22(2):124.
17. Coalson RE, Tomasek JJ. Urogenital System. In: *Embryology* [Internet]. New York, NY: Springer New York; 1992 [cité 6 oct 2024]. p. 95–102. (Oklahoma Notes). Disponible sur: [http://link.springer.com/10.1007/978-1-4612-2900-1\\_18](http://link.springer.com/10.1007/978-1-4612-2900-1_18)
18. Allard S, Adin P, Gouédard L, Clemente ND, Josso N, Orgebin-Crist MC, et al. Molecular mechanisms of hormone-mediated Müllerian duct regression: involvement of  $\beta$ -catenin. *Development.* 1 août 2000;127(15):3349–60.
19. Takeda H, Lasnitzki I, Mizuno T. Analysis of prostatic bud induction by brief androgen treatment in the fetal rat urogenital sinus. *Journal of Endocrinology.* sept 1986;110(3):467–NP.
20. Khera M, Crawford D, Morales A, Salonia A, Morgentaler A. A New Era of Testosterone and Prostate Cancer: From Physiology to Clinical Implications. *European Urology.* janv 2014;65(1):115–23.
21. Anatomy and Physiology of the Prostate. In: *Medical Radiology* [Internet]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 1994 [cité 17 sept 2024]. p. 167–9. Disponible sur: [http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-84431-7\\_8](http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-84431-7_8)
22. Frick J, Aulitzky W. Physiology of the prostate. *Infection.* mai 1991;19(S3):S115–8.
23. Huggins C. THE PHYSIOLOGY OF THE PROSTATE GLAND. *Physiological Reviews.* 1 avr 1945;25(2):281–95.

24. Hayward SW, Cunha GR. THE PROSTATE: DEVELOPMENT AND PHYSIOLOGY. *Radiologic Clinics of North America*. janv 2000;38(1):1-14.
25. Zhang Z, Tian A, Che J, Miao Y, Liu Y, Liu Y, et al. Application and optimization of prostate-specific antigen screening strategy in the diagnosis of prostate cancer: a systematic review. *Front Oncol*. 9 janv 2024;13:1320681.
26. Balk SP, Ko YJ, Bubley GJ. Biology of Prostate-Specific Antigen. *JCO*. 15 janv 2003;21(2):383-91.
27. Desbène C, Boissan M, Loric S, Lamy PJ, Piéroni L. Immuno-analytical characteristics of PSA and derived biomarkers (total PSA, free PSA, p2PSA). *Annales de Biologie Clinique*. févr 2023;81(1):7-23.
28. Boissier R. L'antigène spécifique de la prostate ou PSA. *Progrès en Urologie*. nov 2011;21(11):798-800.
29. Harding TA, Martin RM, Merriel SW, Jones R, O'Sullivan JM, Kirby M, et al. Optimising the use of the prostate-specific antigen blood test in asymptomatic men for early prostate cancer detection in primary care: report from a UK clinical consensus. *Br J Gen Pract*. août 2024;74(745):e534-43.
30. Prostate-Specific Antigen (PSA) [Internet]. Exon Publications; 2024.
31. Grenabo Bergdahl A, Holmberg E, Moss S, Hugosson J. Incidence of Prostate Cancer After Termination of Screening in a Population-based Randomised Screening Trial. *European Urology*. nov 2013;64(5):703-9.
32. 8. Arsov C, Albers P, Herkommer K, Gschwend J, Imkamp F, Peters I, et al. A randomized trial of risk-adapted screening for prostate cancer in young men—

Results of the first screening round of the PROBASE trial. *Intl Journal of Cancer*. juin 2022;150(11):1861–9.

33. FLOCKS RH, URICH VC, PATEL CA, OPITZ JM. Studies on the antigenic properties of prostatic tissue. *I. J Urol*. 1960 Jul;84:134–43. doi: 10.1016/S0022-5347(17)65503-4. PMID: 13823540.

34. Ablin RJ. Immunologic studies of normal, benign, and malignant human prostatic tissue. *Cancer*. 1972 Jun;29(6):1570–4. doi: 10.1002/1097-0142(197206)29:6<1570::aid-cncr2820290621>3.0.co;2-v. PMID: 4624168.

35. Ablin RJ, Soanes WA, Bronson P, Witebsky E. Precipitating antigens of the normal human prostate. *J Reprod Fertil*. 1970 Aug;22(3):573–4. doi: 10.1530/jrf.0.0220573. PMID: 4989232.

36. Hara M, Inoue T, Koyanagi Y et al. Preparation and immunoelectrophoretic assessment of antisera to human seminal plasma. *Nippon Hoigaku Zasshi* 1966; 20: 356

37. Hara M, Koyanagi Y, Inoue T, Fukuyama T. [Some physico-chemical characteristics of " -seminoprotein", an antigenic component specific for human seminal plasma. Forensic immunological study of body fluids and secretion. VII]. *Nihon Hoigaku Zasshi*. 1971 Jul;25(4):322–4. Japanese. PMID: 5106556.

38. Li TS, Beling CG. Isolation and characterization of two specific antigens of human seminal plasma. *Fertil Steril*. 1973 Feb;24(2):134–44. doi: 10.1016/s0015-0282(16)39496-1. PMID: 4631694.

39. Sokoll LJ, Chan DW. Prostate-specific antigen. Its discovery and biochemical characteristics. *Urol Clin North Am.* 1997 May;24(2):253–9. doi: 10.1016/s0094-0143(05)70370-0. PMID: 9126221.
40. Sensabaugh GF. Isolation and characterization of a semen-specific protein from human seminal plasma: a potential new marker for semen identification. *J Forensic Sci.* 1978 Jan;23(1):106–15. PMID: 744956.
41. Sensabaugh GF, Blake ET. Seminal plasma protein p30: simplified purification and evidence for identity with prostate specific antigen. *J Urol.* 1990 Dec;144(6):1523–6. doi: 10.1016/s0022-5347(17)39790-2. PMID: 1700162.
42. Wang MC, Valenzuela LA, Murphy GP, Chu TM. Purification of a human prostate specific antigen. 1979. *J Urol.* 2002 Feb;167(2 Pt 2):960–4; discussion 964–5. doi: 10.1016/s0022-5347(02)80311-1. PMID: 11905925.
43. Papsidero LD, Wang MC, Valenzuela LA, Murphy GP, Chu TM. A prostate antigen in sera of prostatic cancer patients. *Cancer Res.* 1980 Jul;40(7):2428–32. PMID: 7388802.
44. Stamey TA, Yang N, Hay AR, McNeal JE, Freiha FS, Redwine E. Prostate-specific antigen as a serum marker for adenocarcinoma of the prostate. *N Engl J Med.* 1987 Oct 8;317(15):909–16. doi: 10.1056/NEJM198710083171501. PMID: 2442609.
45. Fenton JJ, Weyrich MS, Durbin S, Liu Y, Bang H, Melnikow J. Prostate-Specific Antigen-Based Screening for Prostate Cancer: Evidence Report and Systematic Review for the US Preventive Services Task Force. *JAMA.* 2018 May 8;319(18):1914–1931. doi: 10.1001/jama.2018.3712. PMID: 29801018.

46. Thompson IM, Pauler DK, Goodman PJ, Tangen CM, Lucia MS, Parnes HL, Minasian LM, Ford LG, Lippman SM, Crawford ED, Crowley JJ, Coltman CA Jr. Prevalence of prostate cancer among men with a prostate-specific antigen level  $\leq 4.0$  ng per milliliter. *N Engl J Med*. 2004 May 27;350(22):2239–46. doi: 10.1056/NEJMoa031918. Erratum in: *N Engl J Med*. 2004 Sep 30;351(14):1470. PMID: 15163773.
47. Luining WJ, Hagens MJ, Meijer D, Ringia JB, De Weijer T, Bektas HO, et al. The Probability of Metastases Within Different Prostate-specific Antigen Ranges Using Prostate-specific Membrane Antigen Positron Emission Tomography in Patients with Newly Diagnosed Prostate Cancer. *European Urology Open Science*. janv 2024;59:55–62.
48. Pollen JJ, Dreilinger A. Immunohistochemical identification of prostatic acid phosphatase and prostate specific antigen in female periurethral glands. *Urology*. 1984 Mar;23(3):303–4. PMID: 6199882.
49. Catalona WJ, Richie JP, Ahmann FR, Hudson MA, Scardino PT, Flanigan RC, DeKernion JB, Ratliff TL, Kavoussi LR, Dalkin BL, Waters WB, MacFarlane MT, Southwick PC. Comparison of digital rectal examination and serum prostate specific antigen in the early detection of prostate cancer: results of a multicenter clinical trial of 6,630 men. *J Urol*. 1994 May;151(5):1283–90. doi: 10.1016/s0022-5347(17)35233-3. PMID: 7512659.
50. Pollen JJ, Dreilinger A. Immunohistochemical identification of prostatic acid phosphatase and prostate specific antigen in female periurethral glands. *Urology*. 1984 Mar;23(3):303–4. PMID: 6199882.

51. Svanholm H, Andersen OP, Røhl H. Tumour of female paraurethral duct. Immunohistochemical similarity with prostatic carcinoma. *Virchows Arch A Pathol Anat Histopathol.* 1987;411(4):395–8. doi: 10.1007/BF00713386. PMID: 3114949.
52. Diamandis EP, Yu H. Nonprostatic sources of prostate-specific antigen. *Urol Clin North Am.* 1997 May;24(2):275–82. doi: 10.1016/s0094-0143(05)70373-6. PMID: 9126224
53. Levesque M, Yu H, D'Costa M, Tadross L, Diamandis EP. Immunoreactive prostate-specific antigen in lung tumors. *J Clin Lab Anal.* 1995;9(6):375–9. doi: 10.1002/jcla.1860090607. PMID: 8587005.
54. Levesque M, Hu H, D'Costa M, Diamandis EP. Prostate-specific antigen expression by various tumors. *J Clin Lab Anal.* 1995;9(2):123–8. doi: 10.1002/jcla.1860090209. PMID: 7536238.
55. Ahmed HU, El-Shater Bosaily A, Brown LC, Gabe R, Kaplan R, Parmar MK, Collaco-Moraes Y, Ward K, Hindley RG, Freeman A, Kirkham AP, Oldroyd R, Parker C, Emberton M; PROMIS study group. Diagnostic accuracy of multi-parametric MRI and TRUS biopsy in prostate cancer (PROMIS): a paired validating confirmatory study. *Lancet.* 2017 Feb 25;389(10071):815–822. doi: 10.1016/S0140-6736(16)32401-1. Epub 2017 Jan 20. PMID: 28110982.
56. Oesterling JE. Serum Prostate-Specific Antigen in a Community-Based Population of Healthy Men: Establishment of Age-Specific Reference Ranges. *JAMA.* 18 août 1993;270(7):860.

57. Price CP, Allard J, Davies G, Dawnay A, Duffy MJ, France M, Mandarino G, Ward AM, Patel B, Sibley P, Sturgeon C. Pre- and post-analytical factors that may influence use of serum prostate specific antigen and its isoforms in a screening programme for prostate cancer. *Ann Clin Biochem.* 2001 May;38(Pt 3):188–216. doi: 10.1258/0004563011900632. PMID: 11392495.
58. Borkenhagen JF, Eastwood D, Kilari D, See WA, Van Wickle JD, Lawton CA, et al. Digital Rectal Examination Remains a Key Prognostic Tool for Prostate Cancer: A National Cancer Database Review. *Journal of the National Comprehensive Cancer Network.* juill 2019;17(7):829–37.
59. Yamamoto T, Fukuta F, Masumori N. Does digital rectal examination predict prostate volume greater than 30 mL? *Int J of Urology.* mai 2017;24(5):373–6.
60. Stone BV, Shoag J, Halpern JA, Mittal S, Lewicki P, Golombos DM, et al. Prostate size, nocturia and the digital rectal examination: a cohort study of 30 500 men. *BJU International.* févr 2017;119(2):298–304.
61. Cupp MR, Oesterling JE. Prostate-Specific Antigen, Digital Rectal Examination, and Transrectal Ultrasonography: Their Roles in Diagnosing Early Prostate Cancer. *Mayo Clinic Proceedings.* mars 1993;68(3):297–306.
62. Beatrici E, Frego N, Chiarelli G, Sordelli F, Mancon S, Saitta C, et al. A Comparative Evaluation of Multiparametric Magnetic Resonance Imaging and Micro-Ultrasound for the Detection of Clinically Significant Prostate Cancer in Patients with Prior Negative Biopsies. *Diagnostics.* 1 mars 2024;14(5):525.

63. Pensa J, Brisbane W, Kinnaird A, Kuppermann D, Hughes G, Ushko D, et al. Evaluation of prostate cancer detection using micro-ultrasound versus MRI through co-registration to whole-mount pathology. *Sci Rep.* 14 août 2024;14(1):18910.
64. Sperandeo G, Sperandeo M, Morcaldi M, Caturelli E, Dimitri L, Camagna A. Transrectal Ultrasonography for the Early Diagnosis of Adenocarcinoma of the Prostate: A New Maneuver Designed to Improve the Differentiation of Malignant and Benign Lesions. *Journal of Urology.* févr 2003;169(2):607–10.
65. Aarnink RG, Debruyne FMJ, Wijkstra H. TRANSRECTAL ULTRASOUND OF THE PROSTATE: INNOVATIONS AND FUTURE APPLICATIONS.
66. Mitterberger M, Horninger W, Aigner F, Pinggera GM, Steppan I, Rehder P, et al. Ultrasound of the prostate. *Cancer Imaging.* 2010;10(1):30–48.
67. Heidenreich A, Aus G, Bolla M, Joniau S, Matveev VB, Schmid HP, et al. EAU Guidelines on Prostate Cancer. *European Urology.* janv 2008;53(1):68–80.
68. Mitterberger M, Pelzer A, Colleselli D, Bartsch G, Strasser H, Pallwein L, et al. Contrast-enhanced ultrasound for diagnosis of prostate cancer and kidney lesions. *European Journal of Radiology.* nov 2007;64(2):231–8.
69. May F, Treumann T, Dettmar P, Hartung R, Breul J. Limited value of endorectal magnetic resonance imaging and transrectal ultrasonography in the staging of clinically localized prostate cancer. *BJU International.* janv 2001;87(1):66–9.
70. Kelly IM, Lees WR, Rickards D. Prostate cancer and the role of color Doppler US. *Radiology.* oct 1993;189(1):153–6.

71. Newman JS, Bree RL, Rubin JM. Prostate cancer: diagnosis with color Doppler sonography with histologic correlation of each biopsy site. *Radiology*. avr 1995;195(1):86–90.
72. Alexander AA. To color Doppler image the prostate or not: that is the question. *Radiology*. avr 1995;195(1):11–3.
73. Mitterberger M, Horninger W, Pelzer A, Strasser H, Bartsch G, Moser P, et al. A prospective randomized trial comparing contrast-enhanced targeted versus systematic ultrasound guided biopsies: Impact on prostate cancer detection. *The Prostate*. oct 2007;67(14):1537–42.
74. Frauscher F, Klauser A, Volgger H, Halpern EJ, Pallwein L, Steiner H, et al. Comparison Of Contrast Enhanced Color Doppler Targeted Biopsy With Conventional Systematic Biopsy: Impact On Prostate Cancer Detection. *Journal of Urology*. avr 2002;167(4):1648–52.
75. Mitterberger M, Pinggera GM, Horninger W, Bartsch G, Strasser H, Schäfer G, et al. Comparison of Contrast Enhanced Color Doppler Targeted Biopsy to Conventional Systematic Biopsy: Impact on Gleason Score. *Journal of Urology*. août 2007;178(2):464–8.
76. Salomon G, Köllerman J, Thederan I, Chun FKH, Budäus L, Schlomm T, et al. Evaluation of Prostate Cancer Detection with Ultrasound Real-Time Elastography: A Comparison with Step Section Pathological Analysis after Radical Prostatectomy. *European Urology*. déc 2008;54(6):1354–62.

77. Pallwein L, Mitterberger M, Pinggera G, Aigner F, Pedross F, Gradl J, et al. Sonoelastography of the prostate: Comparison with systematic biopsy findings in 492 patients. *European Journal of Radiology*. févr 2008;65(2):304–10.
78. Bacchetta F, Roth B, Martel P. La révolution de l'IRM prostatique. *Urol Prax*. juin 2024;26(2):65–70.
79. Thompson J, Lawrentschuk N, Frydenberg M, Thompson L, Stricker P, USANZ. The role of magnetic resonance imaging in the diagnosis and management of prostate cancer. *BJU International*. nov 2013;112(S2):6–20.
80. Antolin A, Roson N, Mast R, Arce J, Almodovar R, Cortada R, et al. The Role of Radiomics in the Prediction of Clinically Significant Prostate Cancer in the PI-RADS v2 and v2.1 Era: A Systematic Review. *Cancers*. 24 août 2024;16(17):2951.
81. Kang HC, Jo N, Bamashmos AS, Ahmed M, Sun J, Ward JF, et al. Accuracy of Prostate Magnetic Resonance Imaging: Reader Experience Matters. *European Urology Open Science*. mai 2021;27:53–60.
82. Roy C, Foudi F, Charton J, Jung M, Lang H, Saussine C, et al. Comparative Sensitivities of Functional MRI Sequences in Detection of Local Recurrence of Prostate Carcinoma After Radical Prostatectomy or External-Beam Radiotherapy. *American Journal of Roentgenology*. avr 2013;200(4):W361–8.
83. Hansford BG, Peng Y, Jiang Y, Vannier MW, Antic T, Thomas S, et al. Dynamic Contrast-enhanced MR Imaging Curve-type Analysis: Is It Helpful in the Differentiation of Prostate Cancer from Healthy Peripheral Zone? *Radiology*. mai 2015;275(2):448–57.

84. McEvoy SH, Raeside MC, Chaim J, Ehdaie B, Akin O. Preoperative Prostate MRI: A Road Map for Surgery. *American Journal of Roentgenology*. août 2018;211(2):383–91.
85. Rouvière O, Puech P, Renard-Penna R, Claudon M, Roy C, Mège-Lechevallier F, et al. Use of prostate systematic and targeted biopsy on the basis of multiparametric MRI in biopsy-naïve patients (MRI-FIRST): a prospective, multicentre, paired diagnostic study. *The Lancet Oncology*. janv 2019;20(1):100–9.
86. Pensa J, Brisbane W, Kinnaird A, Kuppermann D, Hughes G, Ushko D, et al. Evaluation of prostate cancer detection using micro-ultrasound versus MRI through co-registration to whole-mount pathology. *Sci Rep*. 14 août 2024;14(1):18910.
87. Schelb P, Kohl S, Radtke JP, Wiesenfarth M, Kickingereeder P, Bickelhaupt S, et al. Classification of Cancer at Prostate MRI: Deep Learning versus Clinical PI-RADS Assessment. *Radiology*. déc 2019;293(3):607–17.
88. Stanzione A, Gambardella M, Cuocolo R, Ponsiglione A, Romeo V, Imbriaco M. Prostate MRI radiomics: A systematic review and radiomic quality score assessment. *European Journal of Radiology*. août 2020;129:109095.
89. Bourgier C, Colinge J, Aillères N, Fenoglietto P, Brengues M, Pèlerin A, et al. Définition et applications cliniques des radiomics. *Cancer/Radiothérapie*. oct 2015;19(6–7):532–7.
90. Penzkofer T, Padhani AR, Turkbey B, Haider MA, Huisman H, Walz J, et al. ESUR/ESUI position paper: developing artificial intelligence for precision

diagnosis of prostate cancer using magnetic resonance imaging. *Eur Radiol.* déc 2021;31(12):9567–78.

91. Tang A, Tam R, Cadrin-Chênevert A, Guest W, Chong J, Barfett J, et al. Canadian Association of Radiologists White Paper on Artificial Intelligence in Radiology. *Can Assoc Radiol J.* mai 2018;69(2):120–35.

92. Singh O, Bolla SR. Anatomy, Abdomen and Pelvis, Prostate. [Updated 2023 Jul 17]. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing; 2024 Jan–. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK540987/>

93. McMinn R. *Lasts anatomy regional and applied*. 9th ed. Australia: Elsevier; 1994.

94. Atug F. Apex: The Crossroads of Functional Recovery and Oncologic Control. In: Davis JW, éditeur. Robot-Assisted Radical Prostatectomy [Internet]. Cham: Springer International Publishing; 2016. p. 99–104. Disponible sur: [http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-32641-2\\_10](http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-32641-2_10)

95. Oelrich TM. The urethral sphincter muscle in the male. *Am J Anat.* 1980;158:229–46.

96. Koraitim MM. The male urethral sphincter complex revisited: an anatomical concept and its physiological correlate. *J Urol.* 2008 May;179(5):1683–9. doi: 10.1016/j.juro.2008.01.010. Epub 2008 Mar 17. PMID: 18343449.

97. Krane RJ. Urinary incontinence after treatment for localized prostate cancer. *Molecular Urology.* 2000 ;4(3):279–86;discussion 287. PMID: 11062385.

98. Myers RP. Practical surgical anatomy for radical prostatectomy. *Urol Clin North Am.* 2001;28:473–90.

99. Lee SE, Byun SS, Lee HJ, Song SH, Chang IH, Kim YJ, Gill MC, Hong SK. Impact of variations in prostatic apex shape on early recovery of urinary continence after radical retropubic prostatectomy. *Urology*. 2006 Jul;68(1):137–41. doi: 10.1016/j.urology.2006.01.021. Epub 2006 Jun 13. PMID: 16777192.
100. Villers AA, McNeal JE, Redwine EA, Freiha FS, Stamey TA. Pathogenesis and Biological Significance of Seminal Vesicle Invasion in Prostatic Adenocarcinoma. *Journal of Urology*. juin 1990;143(6):1183–7.
101. Brooks D, Chao WM, Kerr J. MALE PELVIC ANATOMY RECONSTRUCTED FROM THE VISIBLE HUMAN DATA SET.
102. Myers RP. Detrusor apron, associated vascular plexus, and avascular plane: relevance to radical retropubic prostatectomy--anatomic and surgical commentary. *Urology*. 2002 Apr;59(4):472–9. doi: 10.1016/s0090-4295(02)01500-5. PMID: 11927293.
103. McNeal JE: The prostate gland: morphology and pathobiology. *Monogr Urol* 9: 36–54, 1988.
104. Walz J, Burnett AL, Costello AJ, Eastham JA, Graefen M, Guillonneau B, Menon M, Montorsi F, Myers RP, Rocco B, Villers A. A critical analysis of the current knowledge of surgical anatomy related to optimization of cancer control and preservation of continence and erection in candidates for radical prostatectomy. *Eur Urol*. 2010 Feb;57(2):179–92. doi: 10.1016/j.eururo.2009.11.009. Epub 2009 Nov 11. PMID: 19931974.
105. Takenaka A, Tewari AK, Leung RA, et al. Preservation of the puboprostatic collar and puboperineoplasty for early recovery of urinary continence after

robotic prostatectomy: anatomic basis and preliminary outcomes. *Eur Urol* 2007;51:433–40, discussion 440.

106. Choi HM, Jung SY, Kim SJ, Yang HJ, Kim JH, Kim YT, Shin JC, Lee HY. Clinical Anatomy of the Puboprostatic Ligament for the Safe Guidance for the Prostate Surgery. *Urology*. 2020 Feb;136:190–195. doi: 10.1016/j.urology.2019.10.015. Epub 2019 Nov 12. PMID: 31730940.

107. Poore RE, McCullough DL, Jarow JP. Puboprostatic ligament sparing improves urinary continence after radical retropubic prostatectomy. *Urology*. 1998 Jan;51(1):67–72. doi: 10.1016/s0090–4295(97)00479–2. PMID: 9457291.

108. DeLancey JO. Structural support of the urethra as it relates to stress urinary incontinence: the hammock hypothesis. *Am J Obstet Gynecol*. 1994 Jun;170(6):1713–20; discussion 1720–3. doi: 10.1016/s0002–9378(94)70346–9. PMID: 8203431.

109. Lowe BA. Preservation of the anterior urethral ligamentous attachments in maintaining post–prostatectomy urinary continence: a comparative study. *J Urol*. 1997 Dec;158(6):2137–41. doi: 10.1016/s0022–5347(01)68180–1. PMID: 9366330.

110. Thind P. The significance of smooth and striated muscles in the sphincter function of the urethra in healthy women. *Neurourol Urodyn*. 1995;14(6):585–618. doi: 10.1002/nau.1930140602. PMID: 8750379.

111. Koraitim MM, Atta MA, Fattah GA, Ismail HR. Mechanism of continence after repair of post–traumatic posterior urethral strictures. *Urology*. 2003 Feb;61(2):287–90. doi: 10.1016/s0090–4295(02)02151–9. PMID: 12597932.

112. LAPIDES J, SWEET RB, LEWIS LW. Role of striated muscle in urination. *J Urol.* 1957 Feb;77(2):247–50. doi: 10.1016/S0022–5347(17)66549–2. PMID: 13406873.
113. Sinha S, Sinha U, Malis V, Bhargava V, Sakamoto K, Rajasekaran M. Exploration of male urethral sphincter complex using diffusion tensor imaging (DTI)-based fiber-tracking. *Magnetic Resonance Imaging.* oct 2018;48(4):1002–11.
114. Schlomm T, Heinzer H, Steuber T, Salomon G, Engel O, Michl U, et al. Full Functional–Length Urethral Sphincter Preservation During Radical Prostatectomy. *European Urology.* août 2011;60(2):320–9.
115. Evatt EJ. A Contribution to the Development of the Prostate in Man. *J Anat Physiol.* 1909 Jul;43(Pt 4):314–21. PMID: 17232815; PMCID: PMC1289210.
116. Lowsley OS. The development of the human prostate gland with reference to the development of other structures at the neck of the urinary bladder. *Am J Anat.* juill 1912;13(3):299–349.
117. McNeal JE. Regional Morphology and Pathology of The Prostate. *Am J Clin Pathol.* 1 mars 1968;49(3):347–57.
118. Lee CH, Akin–Olugbade O, Kirschenbaum A. Overview of Prostate Anatomy, Histology, and Pathology. *Endocrinology and Metabolism Clinics of North America.* sept 2011;40(3):565–75.
119. McNeal JE. The zonal anatomy of the prostate. *The Prostate.* janv 1981;2(1):35–49.

120. Amin, M., Khalid, A., Tazeen, N., & Yasoob, M. (2011). Zonal Anatomy of Prostate. *Annals of King Edward Medical University*, 16(3), 138. <https://doi.org/10.21649/akemu.v16i3.212>
121. Aaron L, Franco OE, Hayward SW. Review of Prostate Anatomy and Embryology and the Etiology of Benign Prostatic Hyperplasia. *Urol Clin North Am*. 2016 Aug;43(3):279–88. doi: 10.1016/j.ucl.2016.04.012. PMID: 27476121; PMCID: PMC4968575.
122. McNeal JE. Cancer volume and site of origin of adenocarcinoma in the prostate: Relationship to local and distant spread. *Human Pathology*. mars 1992;23(3):258–66.
123. McNeal JE, Redwine EA, Freiha FS, Stamey TA. Zonal distribution of prostatic adenocarcinoma. Correlation with histologic pattern and direction of spread. *Am J Surg Pathol*. 1988 Dec;12(12):897–906. doi: 10.1097/00000478-198812000-00001. PMID: 3202246.
124. Puech P, Villers A, Mouton D, Leroy X, Lemaître L. Cancer de la prostate : les aspects cliniques, biologiques et histopathologiques utiles au radiologue. *Journal de Radiologie*. févr 2006;87(2):189–200.
125. Cornu JN, Phé V, Fournier G, Delmas V, Sèbe P. Fascia surrounding the prostate: clinical and anatomical basis of the nerve-sparing radical prostatectomy. *Surg Radiol Anat*. 2010 Aug;32(7):663–7. doi: 10.1007/s00276-010-0668-7. Epub 2010 Apr 29. PMID: 20429006.

126. Tewari A, Peabody JO, Fischer M, Sarle R, Vallancien G, Delmas V et al. An operative and anatomic study to help in nerve sparing during laparoscopic and robotic radical prostatectomy. *Eur Urol* 2003; 43: 444–54.
127. Federative Committee on Anatomical Terminology. *Terminologia Anatomica: International Anatomical Terminology*. Stuttgart, Germany: Thieme; 1998.
128. Phé V, Sebe P. Anatomie chirurgicale des fascias de la prostate. *Progrès en Urologie – FMC*. juin 2014;24(2):F47–50.
129. Raychaudhuri B, Cahill D. Pelvic Fasciae in Urology. *annals*. nov 2008;90(8):633–7.
130. Ger R. Surgical anatomy of the pelvis. *Surg Clin North Am*. 1988 Dec;68(6):1201–16. doi: 10.1016/s0039–6109(16)44681–5. PMID: 3194818.
131. Takenaka A, Hara R, Soga H, Murakami G, Fujisawa M. A novel technique for approaching the endopelvic fascia in retropubic radical prostatectomy, based on an anatomical study of fixed and fresh cadavers. *BJU Int*. 2005; 95:766–71.
- Wein AJ, Kavoussi LR. *Campbell–Walsh Urology*. Elsevier Saunders, Philadelphia, 2012.
132. Kiyoshima K, Yokomizo A, Yoshida T *et al*. Anatomical features of periprostatic tissue and its surroundings: a histological analysis of 79 radical retropubic prostatectomy specimens. *Jpn. J. Clin. Oncol*. 2004; 34: 463–8.
133. Stolzenburg JU, Rabenalt R, Do M et al. Intrafascial nerve-sparing endoscopic extraperitoneal radical prostatectomy. *Eur. Urol*. 2008; 53: 931–40.
- 41.

134. Graefen M, Walz J, Huland H. Open retropubic nervesparing radical prostatectomy. *Eur. Urol.* 2006; **49**: 38–48.
135. Budäus L, Isbarn H, Schlomm T *et al.* Current technique of open intrafascial nerve-sparing retropubic prostatectomy. *Eur. Urol.* 2009; **56**: 317–24.
136. Savera AT, Kaul S, Badani K, Stark AT, Shah NL, Menon M. Robotic radical prostatectomy with the “Veil of Aphrodite” technique: histologic evidence of enhanced nerve sparing. *Eur. Urol.* 2006; **49**: 1065–73; discussion 1073–4.
137. Nielsen ME, Schaeffer EM, Marschke P, Walsh PC. High anterior release of the levator fascia improves sexual function following open radical retropubic prostatectomy. *J. Urol.* 2008; **180**: 2557–64; discussion 2564.
138. Hinata N, Sejima T, Takenaka A. Progress in pelvic anatomy from the viewpoint of radical prostatectomy. *Int J of Urology.* mars 2013;**20**(3):260-70.
139. Denonvilliers, C.–P. D.: Anatomie du périnée. *Bull. Sac. Anat., Pans*, **11**: 105, 1836.
140. Denonvilliers, C.–P. D.: Propositions et observations d’anatomie, de physiologie et de pathologie. *These De l’Ecole De Medicine, Pans*, No. 285, **3**: 23, 1837
141. Tobin, C. E. and Benjamin, J. A.: Anatomical and surgical restudy of Denonvilliers’ fascia. *Surg., Gynec. & Obst.*, **80** 373, 1945.
142. Lindsey I, Guy RJ, Warren BF, Mortensen NJ. Anatomy of Denonvilliers' fascia and pelvic nerves, impotence, and implications for the colorectal surgeon. *Br J Surg.* 2000 Oct;**87**(10):1288–99. doi: 10.1046/j.1365–2168.2000.01542.x. PMID: 11044153.

143. Muraoka K, Hinata N, Morizane S, Honda M, Sejima T, Murakami G, Tewari AK, Takenaka A. Site-dependent and interindividual variations in Denonvilliers' fascia: a histological study using donated elderly male cadavers. *BMC Urol.* 2015 May 12;15:42. doi: 10.1186/s12894-015-0034-5. PMID: 25962380; PMCID: PMC4433060.
144. Villers A, Bommelaere T, Walz J. Surgical Anatomy of the Prostate. In: John H, Wiklund P, éditeurs. *Robotic Urology* [Internet]. Cham: Springer International Publishing; 2024 .p. 251-64. Disponible sur: [https://link.springer.com/10.1007/978-3-031-49428-4\\_19](https://link.springer.com/10.1007/978-3-031-49428-4_19)
145. Saad M, Moschini M, Stabile A, Macek P, Lanz C, Prapotnich D, Rozet F, Cathala N, Mombet A, Sanchez-Salas R, Cathelineau X. Long-term functional and oncological outcomes of nerve-sparing and prostate capsule-sparing cystectomy: a single-centre experience. *BJU Int.* 2020 Feb;125(2):253-259. doi: 10.1111/bju.14850. Epub 2019 Jul 12. PMID: 31220396.
146. Jacobs BL, Daignault S, Lee CT, Hafez KS, Montgomery JS, Montie JE, Humrich JE, Hollenbeck BK, Wood DP Jr, Weizer AZ. Prostate capsule sparing versus nerve sparing radical cystectomy for bladder cancer: results of a randomized, controlled trial. *J Urol.* 2015 Jan;193(1):64-70. doi: 10.1016/j.juro.2014.07.090. Epub 2014 Jul 24. PMID: 25066875; PMCID: PMC4368062.
147. Walz J, Epstein JI, Ganzer R, Graefen M, Guazzoni G, Kaouk J, et al. A Critical Analysis of the Current Knowledge of Surgical Anatomy of the Prostate Related to Optimisation of Cancer Control and Preservation of Continence and Erection

in Candidates for Radical Prostatectomy: An Update. *European Urology*. août 2016;70(2):301-11.

148. CLEGG EJ. The arterial supply of the human prostate and seminal vesicles. *J Anat*. 1955 Apr;89(2):209–16. PMID: 14367216; PMCID: PMC1244783.

149. BOUISSOU H, TALAZAC A. Vascularisation artérielle de la prostate normale et pathologique [Arterial vascularization of the normal and the pathological prostate]. *Ann Anat Pathol (Paris)*. 1959 Jan–Mar;4(1):63–79. French. PMID: 13627567.

150. Bilhim T, Pisco JM, Rio Tinto H, Fernandes L, Pinheiro LC, Furtado A, et al. Prostatic Arterial Supply: Anatomic and Imaging Findings Relevant for Selective Arterial Embolization. *Journal of Vascular and Interventional Radiology*. nov 2012;23(11):1403-15.

151. Ambrosio JD, De Almeida JS, De Souza A: Apparent penetration of the arteries into the prostatic capsule in man. *Rev Paul Med* 95:98–100, 1980.

152. Kapranov S.A., Kamalov A.A., Karpov V.K., Bobrov B.Yu., Zlatovratsky A.G., Khachaturov A.A. Endovascular interventions for benign prostatic hyperplasia. In: Alekyan B.G., ed. National leadership: in 3v. X-ray endovascular surgery under the editorship. Moscow: Littera Publishing House, 2017.

153. Słojewski M, Czerwinski F, Sikorski A. Microangiographic imaging of the prostate. *BJU Int*. 2002 May;89(7):776–8. doi: 10.1046/j.1464-410x.2002.02710.x. PMID: 11966646.

154. Mulhall JP, Secin FP, Guillonneau B. Artery Sparing Radical Prostatectomy—Myth or Reality? *Journal of Urology*. mars 2008;179(3):827–31.

155. Bahnson RR, Catalona WJ. Papaverine Testing of Impotent Patients Following Nerve-Sparing Radical Prostatectomy. *Journal of Urology*. avr 1988;139(4):773-4.
156. Breza J, Aboseif SR, Orvis BR, Lue TF and Tanagho EA: Detailed anatomy of penile neurovascular structures: surgical significance. *J Urol* 1989; 141: 437-44. ARTERY SPARING RADICAL PROSTATECTOMY 831
157. Rosen MP, Greenfield AJ, Walker TG, Grant P, Guben JK, Dubrow J et al: Arteriogenic impotence: findings in 195 impotent men examined with selective internal pudendal angiography. Young Investigator's Award. *Radiology* 1990 ;174: 1043.
158. Droupy S, Hessel A, Benoît G, Blanchet P, Jardin A, Giuliano F. Assessment of the functional role of accessory pudendal arteries in erection by transrectal color Doppler ultrasound. *J Urol*. 1999 Dec;162(6):1987-91. doi: 10.1016/S0022-5347(05)68084-6. PMID: 10569553.
159. Polascik TJ, Walsh PC. Radical retropubic prostatectomy: the influence of accessory pudendal arteries on the recovery of sexual function. *J Urol* 1995;154:150-2.
160. Secin FP, Karanikolas N, Touijer AK, Salamanca JIM, Vickers AJ, Guillonneau B. ANATOMY OF ACCESSORY PUDENDAL ARTERIES IN LAPAROSCOPIC RADICAL PROSTATECTOMY. *Journal of Urology*. août 2005;174(2):523-6.
161. Santorini GD. De virorum naturalibus [Concerning the male genitalia]. In: *Observationes anatomicae*. Venice, Italy: G. Baptista Recurti, 1724. Section XX, Chapter 10, p. 202.

162. Power NE, Silberstein JL, Kulkarni GS, Laudone VP. The dorsal venous complex (DVC): dorsal venous or dorsal vasculature complex? Santorini's plexus revisited. *BJU Int.* 2011 Sep;108(6):930–2. doi: 10.1111/j.1464-410X.2011.10586.x. PMID: 21884359; PMCID: PMC4315333.
163. Reiner WG, Walsh PC. An anatomical approach to the surgical management of the dorsal vein and Santorini's plexus during radical retropubic surgery. *J Urol.* 1979 Feb;121(2):198–200. doi: 10.1016/s0022-5347(17)56718-x. PMID: 423333.
164. Benoit G, Droupy S, Quillard J, et al. Supra and infralevator neurovascular pathways to the penile corpora cavernosa. *J Anat* 1999;195(Pt 4):605–15.
165. Mauroy B, Demondion X, Drizenko A, Gouillet E, Bonnal JL, Biserte J, Abbou C. The inferior hypogastric plexus (pelvic plexus): its importance in neural preservation techniques. *Surg Radiol Anat.* 2003 Apr;25(1):6–15. doi: 10.1007/s00276-002-0083-9. Epub 2003 Apr 11. PMID: 12690518.
166. Baader B, Herrmann M. Topography of the pelvic autonomic nervous system and its potential impact on surgical intervention in the pelvis. *Clin Anat* 2003;16:119–30.
167. Costello AJ, Brooks M, Cole OJ. Anatomical studies of the neurovascular bundle and cavernosal nerves. *BJU International.* nov 2004;94(7):1071–6.
168. Schwalenberg T, Neuhaus J, Liatsikos E, Winkler M, Löffler S, Stolzenburg JU. Neuroanatomy of the male pelvis in respect to radical prostatectomy including three-dimensional visualization. *BJU Int.* 2010 Jan;105(1):21–7. doi: 10.1111/j.1464-410X.2009.08702.x. Epub 2009 Jun 22. PMID: 19549118.

169. Ali M, Johnson IP, Hobson J, Mohammadi B, Khan F. Anatomy of the pelvic plexus and innervation of the prostate gland. *Clin Anat.* 2004 Mar;17(2):123–9. doi: 10.1002/ca.10187. PMID: 14974100.
170. Walsh PC, Donker PJ. Impotence Following Radical Prostatectomy: Insight Into Etiology and Prevention. *Journal of Urology.* sept 1982;128(3):492–7.
171. Lepor H, Gregerman M, Crosby R, Mostofi FK, Walsh PC. Precise Localization of the Autonomic Nerves From the pelvic Plexus to the Corpora Cavernosa: a Detailed Anatomical Study of the Adult Male Pelvis. *Journal of Urology* [Internet]. 1985 Feb 1;133(2):207–12. Available from: [https://doi.org/10.1016/S0022-5347\(17\)48885-9](https://doi.org/10.1016/S0022-5347(17)48885-9)
172. Kiyoshima K. Anatomical Features of Periprostatic Tissue and its Surroundings: a Histological Analysis of 79 Radical Retropubic Prostatectomy Specimens. *Japanese Journal of Clinical Oncology.* 1 août 2004;34(8):463–8.
173. Ganzer R, Stolzenburg JU, Wieland WF, Bründl J. Anatomic study of periprostatic nerve distribution: immunohistochemical differentiation of parasympathetic and sympathetic nerve fibres. *Eur Urol.* 2012 Dec;62(6):1150–6. doi: 10.1016/j.eururo.2012.03.039. Epub 2012 Mar 28. PMID: 22469393.
174. Nielsen ME, Schaeffer EM, Marschke P, Walsh PC. High anterior release of the levator fascia improves sexual function following open radical retropubic prostatectomy. *J Urol.* 2008 Dec;180(6):2557–64; discussion 2564. doi: 10.1016/j.juro.2008.08.047. Epub 2008 Oct 19. PMID: 18930504.

175. Kanso C, Amar E, Bondil P, Boccon-Gibod L, Delmas V. Préservation de la fonction érectile et prostatectomie radicale : que faut-il penser en 2005 ? Progrès en Urologie. 2005;
176. Preisser F, Gandaglia G, Arad F, Karakiewicz PI, Bandini M, Pompe RS, Montorsi F, Graefen M, Huland H, Briganti A, Tilki D. Association of neurovascular bundle preservation with oncological outcomes in patients with high-risk prostate cancer. *Prostate Cancer Prostatic Dis.* 2021 Mar;24(1):193–201. doi: 10.1038/s41391-020-00266-4. Epub 2020 Aug 19. PMID: 32814844.
177. Kumar A, Samavedi S, Patel VR. Neurovascular Bundle Preservation: Anatomic and Technical Considerations. In: Davis JW, éditeur. *Robot-Assisted Radical Prostatectomy* [Internet]. Cham: Springer International Publishing; 2016 p. 57–73. Disponible sur: [http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-32641-2\\_6](http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-32641-2_6)
178. Reeves, F., Preece, P., Kapoor, J., Everaerts, W., Murphy, D. G., Corcoran, N. M., & Costello, A. J. (2014). Preservation of the Neurovascular Bundles Is Associated with Improved Time to Continence After Radical Prostatectomy But Not Long-term Continence Rates: Results of a Systematic Review and Meta-analysis. *European Urology*, 68(4), 692–704. <https://doi.org/10.1016/j.eururo.2014.10.020>
179. BENEVENTI FA, NOBACK GJ. Distribution of the blood vessels of the prostate gland and urinary bladder; application retropubic prostatectomy. *J Urol.* 1949 Nov;62(5):663–71. doi: 10.1016/S0022-5347(17)68986-9. PMID: 15391240.

180. Myers RP. Anatomical variation of the superficial preprostatic veins with respect to radical retropubic prostatectomy. *J Urol*. 1991 May;145(5):992–3. doi: 10.1016/s0022-5347(17)38510-5. PMID: 2016816.
181. Ferretti S, Dell'Oglio P, Ciavarella D, Galfano A, Schips L, Marchioni M. Retzius–Sparing Robotic–Assisted Prostatectomy: Technical Challenges for Surgeons and Key Prospective Refinements. *Res Rep Urol*. 2023 Dec 12;15:541–552. doi: 10.2147/RRU.S372803. PMID: 38106985; PMCID: PMC10725648.
182. McNicholas TA. Benign prostatic hyperplasia and new treatment options – a critical appraisal of the UroLift system. *Med Devices (Auckl)*. 2016 May 19;9:115–23. doi: 10.2147/MDER.S60780. PMID: 27274321; PMCID: PMC4876946.
183. Zazzara M, Gardiman MP, Dal Moro F. The bladder neck preservation in robot assisted radical prostatectomy: Surgical and pathological outcome. *Arch Ital Urol Androl*. 2023 Dec 28;95(4):12138. doi: 10.4081/aiua.2023.12138. PMID: 38193218.
184. Wagaskar VG, Mittal A, Sobotka S, Ratnani P, Lantz A, Falagarino UG, Martini A, Dovey Z, Treacy PJ, Pathak P, Nair S, Roy B, Chakravarty D, Lewis S, Haines K 3rd, Wiklund P, Tewari A. Hood Technique for Robotic Radical Prostatectomy–Preserving Periurethral Anatomical Structures in the Space of Retzius and Sparing the Pouch of Douglas, Enabling Early Return of Continence Without Compromising Surgical Margin Rates. *Eur Urol*. 2021 Aug;80(2):213–221. doi: 10.1016/j.eururo.2020.09.044. Epub 2020 Oct 14. PMID: 33067016.

185. Spinos T, Kyriazis I, Tsaturyan A, Stolzenburg JU, Liatsikos E, Al-Aown A, Kallidonis P. Sphincter preservation techniques during radical prostatectomies: Lessons learned. *Urol Ann.* 2023 Oct-Dec;15(4):353–359. doi: 10.4103/ua.ua\_126\_22. Epub 2023 Oct 20. PMID: 38074182; PMCID: PMC10699177.
186. Meldrum KK, Mathews R, Gearhart JP. HUGH HAMPTON YOUNG: A PIONEER IN PEDIATRIC UROLOGY. *Journal of Urology.* oct 2001;166(4):1415–7.
187. Weldon VE, Tavel FR. Potency-sparing radical perineal prostatectomy: anatomy, surgical technique and initial results. *J Urol.* 1988 Sep;140(3):559–62. doi: 10.1016/s0022-5347(17)41718-6. PMID: 3411674.
188. Belt E, Ebert CE, Surber AC. A New Anatomic Approach in Perineal Prostatectomy. *Journal of Urology.* avr 1939;41(4):482–97.
189. Young HH. The Cure of Cancer of the Prostate by Radical Perineal Prostatectomy (prostate- seminal Vesiculectomy): History, Literature and Statistics of Young's Peration. *Journal of Urology.* janv 1945;53(1):188–252.
190. Holzbeierlein, J. M., Langenstroer, P., Porter, H., II, & Thrasher, J. B. (2003). Case selection and outcome of radical perineal prostatectomy in localized prostate cancer. *International Braz J Urol,* 29(4), 291–299. <https://doi.org/10.1590/s1677-55382003000400002>
191. Comploj E, Palermo S, Trenti E, Martini T, Lodde M, Mian C, Mazzoleni G, Pycha A. Radical perineal prostatectomy: An outdated procedure? *Int J Surg.* 2011;9(5):400–3. doi: 10.1016/j.ijssu.2011.03.027. Epub 2011 Apr 2. PMID: 21443972.

192. Goddard, J. C., & Dinneen, M. D. (2020). Terence Millin (1903–1980). *Trends in Urology & Men S Health*, 11(6), 29–31. <https://doi.org/10.1002/tre.779>
193. Millin T, Dubl MC. Retropubic prostatectomy: A new extravesical technique report on 20 cases. *Journal of Urology*. févr 2002;167(2 Part 2):976–9.
194. Fitzpatrick JM. Millin Retropubic Prostatectomy. *BJU International*. oct 2008;102(7):906–16.
195. Walsh PC. (2007). The discovery of the cavernous nerves and development of nerve sparing radical retropubic prostatectomy. *J Urol*, 177(5), 1632–1635. doi: 10.1016/j.juro.2007.01.012
196. Walsh PC. Anatomic radical prostatectomy: evolution of the surgical technique. *J Urol*. 1998 Dec;160(6 Pt 2):2418–24. doi: 10.1097/00005392-199812020-00010. PMID: 9817395.
197. Eggleston JC, Walsh PC. Radical Prostatectomy with Preservation of Sexual Function: Pathological Findings in the First 100 Cases. *Journal of Urology*. déc 1985;134(6):1146–8.
198. Chauveau, P., Barre, C., Picard, H. *et al.* Prostatectomie radicale rétropubienne avec préservation nerveuse. Technique et résultats à propos de 200 cas. *Androl*. 13, 232–241 (2003). <https://doi.org/10.1007/BF03034877>
199. Moussa M, Abou Chakra M, Peyromaure M, Barry Delongchamps N, Bailly H, Duquesne I. Comparison of oncological, surgical, and functional outcomes between radical retropubic and radical perineal prostatectomy: A multi-

- institutional study. *Urologia*. 2023 Feb;90(1):89–99. doi: 10.1177/03915603221111286. Epub 2022 Jul 15. PMID: 35837737.
200. Alkatout I, Mechler U, Mettler L, Pape J, Maass N, Biebl M, Gitas G, Laganà AS, Freytag D. The Development of Laparoscopy—A Historical Overview. *Front Surg*. 2021 Dec 15;8:799442. doi: 10.3389/fsurg.2021.799442. PMID: 34977146; PMCID: PMC8714650.
201. 1 200 Jahre Endoskopie des Verdauungstrakts – ein konziser Bericht. In: *Gastroenterologische Endoskopie [Internet]*. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG; 2014. Disponible sur: <http://www.thieme-connect.de/products/ebooks/lookinside/10.1055/b-0034-18745>
202. Litynski GS. Endoscopic surgery: the history, the pioneers. *World J Surg*. 1999 Aug;23(8):745–53. doi: 10.1007/s002689900576. PMID: 10415199.
203. Kaiser AM, Corman ML. History of laparoscopy. *Surg Oncol Clin N Am*. 2001 Jul;10(3):483–92. PMID: 11685923.
204. Curto F, Benijts J, Pansadoro A, Barmoshe S, Hoepffner JL, Mugnier C, et al. Nerve Sparing Laparoscopic Radical Prostatectomy: Our Technique. *European Urology*. févr 2006;49(2):344–52.
205. Rassweiler JJ, Teber D. Advances in laparoscopic surgery in urology. *Nat Rev Urol*. 2016 Jul;13(7):387–99. doi: 10.1038/nrurol.2016.70. Epub 2016 May 24. PMID: 27215426.
206. Mohammad S. Robotic surgery. *J Oral Biol Craniofac Res*. 2013 Jan–Apr;3(1):2. doi: 10.1016/j.jobcr.2013.03.002. PMID: 25737871; PMCID: PMC3941295. 1

207. Kwoh YS, Hou J, Jonckheere EA, Hayati S. A robot with improved absolute positioning accuracy for CT guided stereotactic brain surgery. *IEEE Trans Biomed Eng.* 1988 Feb;35(2):153–60. doi: 10.1109/10.1354. PMID: 3280462.
208. Drake JM, Joy M, Goldenberg A, Kreindler D. Computer- and robot-assisted resection of thalamic astrocytomas in children. *Neurosurgery.* 1991 Jul;29(1):27–33. doi: 10.1097/00006123-199107000-00005. PMID: 1870684.
209. Hemal AK, Menon M. Robotics in urology. *Curr Opin Urol.* 2004 Mar;14(2):89–93. doi: 10.1097/00042307-200403000-00007. PMID: 15075836.
210. Nathan CO, Chakradeo V, Malhotra K, D'Agostino H, Patwardhan R. The voice-controlled robotic assist scope holder AESOP for the endoscopic approach to the sella. *Skull Base.* 2006 Aug;16(3):123–31. doi: 10.1055/s-2006-939679. PMID: 17268585; PMCID: PMC1586176.
211. Marescaux J, Rubino F. The ZEUS robotic system: experimental and clinical applications. *Surg Clin North Am.* 2003 Dec;83(6):1305–15, vii–viii. doi: 10.1016/S0039-6109(03)00169-5. PMID: 14712867.
212. Binder J, Kramer W. Robotically-assisted laparoscopic radical prostatectomy. *BJU Int.* 2001 Mar;87(4):408–10. doi: 10.1046/j.1464-410x.2001.00115.x. PMID: 11251539.
213. Menon M, Tewari A, Baize B, Guillonneau B, Vallancien G. Prospective comparison of radical retropubic prostatectomy and robot-assisted anatomic prostatectomy: the Vattikuti Urology Institute experience. *Urology.* 2002 Nov;60(5):864–8. doi: 10.1016/s0090-4295(02)01881-2. PMID: 12429317.

214. Chopra S, Srivastava A, Tewari A. Robotic radical prostatectomy: The new gold standard. *Arab J Urol.* 2012 Mar;10(1):23–31. doi: 10.1016/j.aju.2011.12.005. Epub 2012 Feb 2. PMID: 26558001; PMCID: PMC4442908.
215. Schuessler WW, Schulam PG, Clayman RV, Kavoussi LR. Laparoscopic radical prostatectomy: initial short-term experience. *Urology.* 1997 Dec;50(6):854–7. doi: 10.1016/S0090–4295(97)00543–8. PMID: 9426713.
216. Artibani W, Fracalanza S, Cavalleri S, Iafrate M, Aragona M, Novara G, Gardiman M, Ficarra V. Learning curve and preliminary experience with da Vinci–assisted laparoscopic radical prostatectomy. *Urol Int.* 2008;80(3):237–44. doi: 10.1159/000127333. Epub 2008 May 14. PMID: 18480623.
217. Pugin F, Bucher P, Morel P. History of robotic surgery: from AESOP® and ZEUS® to da Vinci®. *J Visc Surg.* 2011 Oct;148(5 Suppl):e3–8. doi: 10.1016/j.jviscsurg.2011.04.007. Epub 2011 Oct 4. PMID: 21974854.
218. Hakenberg OW. A brief overview of the development of robot–assisted radical prostatectomy. *Arab J Urol.* 2018 Jul 24;16(3):293–296. doi: 10.1016/j.aju.2018.06.006. PMID: 30140464; PMCID: PMC6104667.
219. Moran PS, O'Neill M, Teljeur C, Flattery M, Murphy LA, Smyth G, Ryan M. Robot–assisted radical prostatectomy compared with open and laparoscopic approaches: a systematic review and meta–analysis. *Int J Urol.* 2013 Mar;20(3):312–21. doi: 10.1111/iju.12070. Epub 2013 Jan 14. PMID: 23311943.
220. Haney CM, Kowalewski KF, Westhoff N, Holze S, Checcuci E, Neuberger M, Haapiainen H, Egen L, Antti K, Porpiglia F, Stolzenburg JU. Robot–assisted Versus

Conventional Laparoscopic Radical Prostatectomy: A Systematic Review and Meta-analysis of Randomised Controlled Trials. *Eur Urol Focus*. 2023 Nov;9(6):930–937. doi: 10.1016/j.euf.2023.05.007. Epub 2023 Jun 21. PMID: 37353415.

221. Eckhoff, Jennifer A1,2; Müller, Dolores T2; Brunner, Stefanie N2; Fuchs, Hans F2; Meireles, Ozanan R1. Do the costs of robotic surgery present an insurmountable obstacle? A narrative review. *International Journal of Abdominal Wall and Hernia Surgery* 6(2):p 71–76, April–June 2023. | DOI: 10.4103/ijawhs.IJAWHS\_62\_22

222. Childers CP, Maggard–Gibbons M. Estimation of the Acquisition and Operating Costs for Robotic Surgery. *JAMA*. 2018 Aug 28;320(8):835–836. doi: 10.1001/jama.2018.9219. PMID: 30167686; PMCID: PMC6142989.

223. Menon M, Shrivastava A, Kaul S, Badani KK, Fumo M, Bhandari M, Peabody JO. Vattikuti Institute prostatectomy: contemporary technique and analysis of results. *Eur Urol*. 2007 Mar;51(3):648–57; discussion 657–8. doi: 10.1016/j.eururo.2006.10.055. Epub 2006 Nov 3. PMID: 17097214.

224. Brower V. The cutting edge in surgery. Telesurgery has been shown to be feasible—now it has to be made economically viable. *EMBO Rep*. 2002 Apr;3(4):300–1. doi: 10.1093/embo-reports/kvf083. PMID: 11943754; PMCID: PMC1084071.

225. ONCORAD Group réalise une première mondiale dans la chirurgie à distance Le Maroc au sommet de l'innovation médicale. (2001, November 20). PR+. <https://pr.imperium.plus/pressrelease/oncorad-group/oncorad-group->

[realise-une-premiere-mondiale-dans-la-chirurgie-a-distance-le-maroc-au-sommet-de-l-innovation-medicale/ggrswxwww/fxfmwsgmp](#)

226. Berry SJ, Coffey DS, Walsh PC, Ewing LL. The development of human benign prostatic hyperplasia with age. *J Urol.* 1984 Sep;132(3):474-9. doi: 10.1016/s0022-5347(17)49698-4. PMID: 6206240.

227. Egan KB. The Epidemiology of Benign Prostatic Hyperplasia Associated with Lower Urinary Tract Symptoms: Prevalence and Incident Rates. *Urol Clin North Am.* 2016 Aug;43(3):289-97. doi: 10.1016/j.ucl.2016.04.001. PMID: 27476122.

228. Lower urinary tract symptoms in men: management. London: National Institute for Health and Care Excellence (NICE); 2015 Jun. (NICE Clinical Guidelines, No. 97.) Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK553261/>

229. STERN M. RESECTION OF OBSTRUCTIONS AT THE VESICAL ORIFICE: NEW INSTRUMENTS AND A NEW METHOD. *JAMA.* 1926;87(21):1726-1730. doi:10.1001/jama.1926.02680210032010

230. Sandhu JS, Bixler BR, Dahm P, et al. Management of lower urinary tract symptoms attributed to benign prostatic hyperplasia (BPH): AUA Guideline amendment 2023. *J Urol.* 2023;10.1097/JU.0000000000003698. <https://doi.org/10.1097/JU.0000000000003698>

231. Izard J, Nickel JC. Impact of medical therapy on transurethral resection of the prostate: two decades of change. *BJU Int.* 2011 Jul;108(1):89-93. doi: 10.1111/j.1464-410X.2010.09737.x. Epub 2010 Sep 30. PMID: 20883490.

232. Young MJ, Elmussareh M, Morrison T, Wilson JR. The changing practice of transurethral resection of the prostate. *Ann R Coll Surg Engl.* 2018 Apr;100(4):326–329. doi: 10.1308/rcsann.2018.0054. Epub 2018 Mar 15. PMID: 29543050; PMCID: PMC5958867.
233. Singh H, Desai MR, Shrivastav P, Vani K. Bipolar versus monopolar transurethral resection of prostate: randomized controlled study. *J Endourol.* 2005 Apr;19(3):333–8. doi: 10.1089/end.2005.19.333. PMID: 15865523.
234. Alexander CE, Scullion MMF, Omar MI, Yuan Y, Mamoulakis C, N'Dow JMO, Chen C, Lam TBL. Reprint – Bipolar vs. monopolar transurethral resection of the prostate for lower urinary tract symptoms secondary to benign prostatic obstruction: A Cochrane review. *Can Urol Assoc J.* 2020 Dec;14(12):423–430. doi: 10.5489/cuaj.6464. PMID: 32569563; PMCID: PMC7704097.
235. *EAU Guidelines. Edn. presented at the EAU Annual Congress Paris April 2024. ISBN 978-94-92671-23-3.*
236. Rassweiler, J., et al. Bipolar transurethral resection of the prostate—technical modifications and early
237. Heidler H. Frequency and causes of fluid absorption: a comparison of three techniques for resection of the prostate under continuous pressure monitoring. *BJU Int.* 1999 Apr;83(6):619–22. doi: 10.1046/j.1464-410x.1999.00969.x. PMID: 10233567.
238. Patwardhan, S. (2014). *Common Urologic Problems: Benign Prostatic Hyperplasia.* Jaypee Brothers Medical.

239. Agrawal MS, Mishra DK. Transurethral Resection of Prostate. *Journal of Endourology*. 1 sept 2022;36(S2):S-29-S-34.
240. Zwergel U, Wullich B, Lindenmeir U, Rohde V, Zwergel T. Long-term results following transurethral resection of the prostate. *Eur Urol*. 1998;33(5):476-80. doi: 10.1159/000019638. PMID: 9643667.
241. Eredics K, Wachabauer D, Röthlin F, Madersbacher S, Schauer I. Reoperation Rates and Mortality After Transurethral and Open Prostatectomy in a Long-term Nationwide Analysis: Have We Improved Over a Decade? *Urology*. 2018 Aug;118:152-157. doi: 10.1016/j.urology.2018.04.032. Epub 2018 May 4. PMID: 29733869.
242. Doyle RW, Feggetter GY. ENDOSCOPIC RESECTION OF THE PROSTATE: A CRITICAL SURVEY OF 150 CASES. *Br Med J*. 1935 Jan 26;1(3864):147-51. doi: 10.1136/bmj.1.3864.147. PMID: 20778807; PMCID: PMC2459475.
243. Rassweiler J, Teber D, Kuntz R, Hofmann R. Complications of transurethral resection of the prostate (TURP)--incidence, management, and prevention. *Eur Urol*. 2006 Nov;50(5):969-79; discussion 980. doi: 10.1016/j.eururo.2005.12.042. Epub 2006 Jan 30. PMID: 16469429.
244. Yang Q, Peters TJ, Donovan JL, Wilt TJ, Abrams P. Transurethral incision compared with transurethral resection of the prostate for bladder outlet obstruction: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *J Urol*. 2001 May;165(5):1526-32. PMID: 11342911.

245. Kletscher BA, Oesterling JE. Transurethral incision of the prostate: a viable alternative to transurethral resection. *Semin Urol.* 1992 Nov;10(4):265–72. PMID: 1283025.
246. Taylor BL, Jaffe WI. Electrosurgical transurethral resection of the prostate and transurethral incision of the prostate (monopolar techniques). 2015;
247. Madersbacher S, Marberger M. Is transurethral resection of the prostate still justified? *BJU Int.* 1999 Feb;83(3):227–37. doi: 10.1046/j.1464-410x.1999.00908.x. PMID: 10233485.
248. Lourenco, T., Shaw, M., Fraser, C. *et al.* The clinical effectiveness of transurethral incision of the prostate: a systematic review of randomised controlled trials. *World J Urol* **28**, 23–32 (2010). <https://doi.org/10.1007/s00345-009-0496-8>
249. Marra G, Sturch P, Oderda M, Tabatabaei S, Muir G, Gontero P. Systematic review of lower urinary tract symptoms/benign prostatic hyperplasia surgical treatments on men's ejaculatory function: Time for a bespoke approach? *Int J Urol.* 2016 Jan;23(1):22–35. doi: 10.1111/iju.12866. Epub 2015 Jul 14. PMID: 26177667.
250. Nadeem A, Ahmad H, Rana SM, Mahmood A, Alvi MS, Akmal M. Transurethral incision of prostate (TUIP) for minimally enlarged prostates. *J Coll Physicians Surg Pak.* 2010 Jan;20(1):51–4. PMID: 20141694.
251. Leslie SW, Chargui S, Stormont G. Transurethral Resection of the Prostate. [Updated 2023 Sep 4]. In: StatPearls [Internet]. Treasure Island (FL): StatPearls

Publishing; 2024 Jan-. Available from:

<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK560884/>

252. Cornu JN, Gacci M, Hashim H, Herrmann TRW, Malde S, Netsch C, et al. EAU Guidelines on Non-Neurogenic Male Lower Urinary Tract Symptoms (LUTS). 2024;

253. Bach T, Muschter R, Sroka R, Gravas S, Skolarikos A, Herrmann TR, Bayer T, Knoll T, Abbou CC, Janetschek G, Bachmann A, Rassweiler JJ. Laser treatment of benign prostatic obstruction: basics and physical differences. *Eur Urol*. 2012 Feb;61(2):317-25. doi: 10.1016/j.eururo.2011.10.009. Epub 2011 Oct 21. PMID: 22033173.

254. Kuntz RM, Lehrich K. Transurethral holmium laser enucleation versus transvesical open enucleation for prostate adenoma greater than 100 gm.: a randomized prospective trial of 120 patients. *J Urol*. 2002 Oct;168(4 Pt 1):1465-9. doi: 10.1016/S0022-5347(05)64475-8. PMID: 12352419.

255. Gilling PJ, Cass CB, Malcolm AR, Fraundorfer MR. Combination holmium and Nd:YAG laser ablation of the prostate: initial clinical experience. *J Endourol*. 1995 Apr;9(2):151-3. doi: 10.1089/end.1995.9.151. PMID: 7633476.

256. Gilling PJ, Cass CB, Cresswell MD, Fraundorfer MR. Holmium laser resection of the prostate: preliminary results of a new method for the treatment of benign prostatic hyperplasia. *Urology*. 1996 Jan;47(1):48-51. doi: 10.1016/s0090-4295(99)80381-1. PMID: 8560662.

257. Tan AH, Gilling PJ, Kennett KM, Frampton C, Westenberg AM, Fraundorfer MR. A randomized trial comparing holmium laser enucleation of the prostate with transurethral resection of the prostate for the treatment of bladder outlet

obstruction secondary to benign prostatic hyperplasia in large glands (40 to 200 grams). J Urol. 2003 Oct;170(4 Pt 1):1270-4. doi: 10.1097/01.ju.0000086948.55973.00. PMID: 14501739.

258. Pedraza R, Samadi A, Eshghi M. Holmium laser enucleation of the prostate in critically ill patients with technique modification. J Endourol. 2004 Oct;18(8):795-8. doi: 10.1089/end.2004.18.795. PMID: 15659906.

259. Elzayat EA, Elhilali MM. Holmium laser enucleation of the prostate (HoLEP): long-term results, reoperation rate, and possible impact of the learning curve. Eur Urol. 2007 Nov;52(5):1465-71. doi: 10.1016/j.eururo.2007.04.074. Epub 2007 May 4. PMID: 17498867.

260. Kuntz RM. Laser treatment of benign prostatic hyperplasia. World J Urol. 2007 Jun;25(3):241-7. doi: 10.1007/s00345-007-0170-y. Epub 2007 May 25. PMID: 17530259.

261. Kim M, Lee HE, Oh SJ. Technical Aspects of Holmium Laser Enucleation of the Prostate for Benign Prostatic Hyperplasia. Korean J Urol. 2013 Sep;54(9):570-579. <https://doi.org/10.4111/kju.2013.54.9.570>

262. Rücker F, Lehrich K, Böhme A, Zacharias M, Ahyai SA, Hansen J. A call for HoLEP: en-bloc vs. two-lobe vs. three-lobe. World J Urol. 2021 Jul;39(7):2337-2345. doi: 10.1007/s00345-021-03598-5. Epub 2021 Jan 24. PMID: 33486536.

263. Fraundorfer MR, Gilling PJ. Holmium:YAG laser enucleation of the prostate combined with mechanical morcellation: preliminary results. Eur Urol. 1998;33(1):69-72. doi: 10.1159/000019535. PMID: 9471043.

264. Fourmarier M, Faure A, Negre T, Arroua F, Eghazarian C. Trucs et astuces. Énucléation de la prostate au laser holmium (HoLEP). Progrès en Urologie – FMC. sept 2014;24(3):F64–7.
265. Scoffone CM, Cracco CM. The en-bloc no-touch holmium laser enucleation of the prostate (HoLEP) technique. World J Urol. août 2016;34(8):1175–81.
266. Li P, Wang C, Tang M, Han P, Meng X. Holmium laser enucleation of prostate by using en-bloc and bladder neck preservation technique: technical consideration and influence on functional outcomes. Transl Androl Urol. 2021 Jan;10(1):134–142. doi: 10.21037/tau-20-852. PMID: 33532303; PMCID: PMC7844485.
267. Shvero A, Kloniecke E, Capella C, Das AK. HoLEP techniques – lessons learned. lessons learned. 2021;
268. Das AK, Teplitsky S, Humphreys MR. Holmium laser enucleation of the prostate (HoLEP): a review and update. 2019;
269. Vincent MW, Gilling PJ. HoLEP has come of age. World J Urol. avr 2015;33(4):487–93.
270. Bapat S, Umranikar S, Satav V, Bapat A, Joshi A, Ranade G. Comparison of fluid absorption during transurethral resection of prostate and Holmium-Yag laser enucleation of benign adenoma of prostate using breath ethanol concentration. Indian J Urol. 2007 Apr;23(2):126–9. doi: 10.4103/0970-1591.32061. PMID: 19675787; PMCID: PMC2721519.
271. Elmansy HM, Kotb A, Elhilali MM. Holmium laser enucleation of the prostate: long-term durability of clinical outcomes and complication rates during

10 years of followup. J Urol. 2011 Nov;186(5):1972–6. doi: 10.1016/j.juro.2011.06.065. Epub 2011 Sep 23. PMID: 21944127.

272. Porto JG, Blachman–Braun R, Delgado C, Zarli M, Chen R, Ajami T, Marcovich R, Shah HN. Is Holmium Laser Enucleation of the Prostate Truly Size–Independent? A Critical Evaluation at the Extreme Ends of the Spectrum. Urology. 2023 Dec;182:204–210. doi: 10.1016/j.urology.2023.09.002. Epub 2023 Sep 15. PMID: 37716456.

273. Salonia A, Suardi N, Naspro R, Mazzoccoli B, Zanni G, Gallina A, Bua L, Scattoni V, Rigatti P, Montorsi F. Holmium laser enucleation versus open prostatectomy for benign prostatic hyperplasia: an inpatient cost analysis. Urology. 2006 Aug;68(2):302–6. doi: 10.1016/j.urology.2006.02.007. PMID: 16904441.



أطروحة رقم 25/055

سنة 2025

## التشريح الجراحي للبروستاتا

### الأطروحة

قدمت و نوقشت علانية يوم 2025/02/10

### من طرف

السيد شرقي ياسين

المزداد في 16 يناير 1998 بمكناس

## لنيل شهادة الدكتوراه في الطب

### اللجنة

السيد ملاس سفيان ..... الرئيس

أستاذ في علم التشريح

السيد العنزاوي جهاد ..... المشرف

أستاذ في جراحة المسالك البولية

السيد البحري عبد الصمد

أستاذ في جراحة المسالك البولية

السيد سينا محمد

أستاذ في علم التشريح المرضي

أعضاء