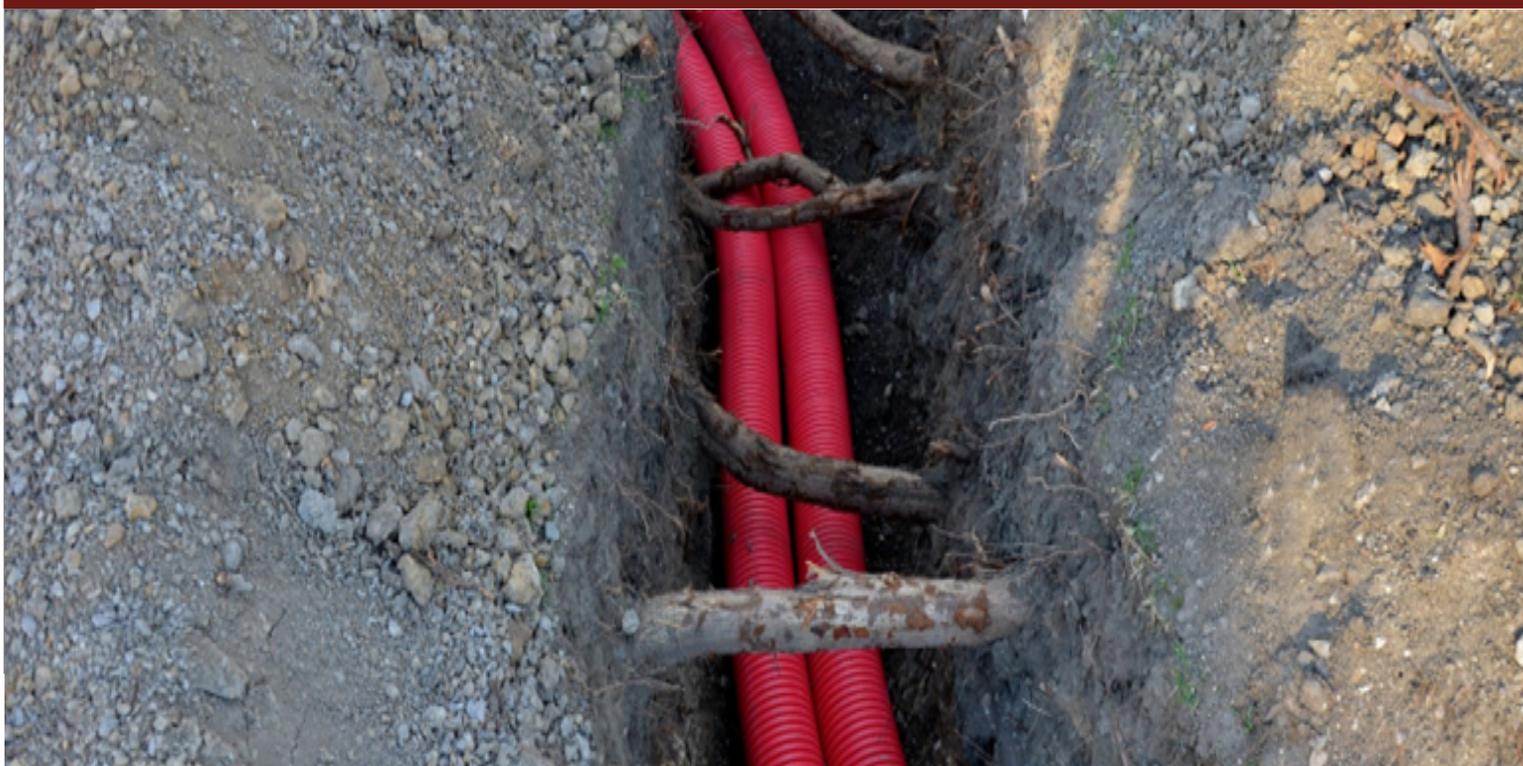


Implantation des arbres en zone urbaine à proximité du réseau souterrain



RÉSEAUX
TECHNIQUES URBAINS



INFRASTRUCTURES
SOUTERRAINES

MISSION DU CERIU

Mettre en œuvre toute action de transfert de connaissance et de recherche appliquée pouvant favoriser le développement du savoir-faire, des techniques, des normes et des politiques supportant la gestion durable et économique des infrastructures et la compétitivité des entreprises qui œuvrent dans le secteur.

À PROPOS

LE CERIU

Fondé en 1994, le Centre d'expertise et de recherche en infrastructures urbaines (CERIU) est un organisme à but non lucratif né du besoin de réhabiliter les infrastructures municipales de façon performante et à des coûts acceptables.

Grâce à l'expertise variée de ses 200 partenaires et membres organisationnels regroupant municipalités, entreprises, ministères, laboratoires et institutions d'enseignement et à son approche unique axée sur le partenariat et la concertation, le CERIU est l'un des seuls organismes à offrir une perspective intégrée en regard des enjeux reliés aux infrastructures urbaines.

Véritable centre d'innovation, le CERIU œuvre à changer les mentalités et les habitudes afin de promouvoir de nouvelles manières de faire plus efficaces et plus économiques ainsi qu'à développer des outils adaptés aux besoins des municipalités et des entreprises de services publics.

LE CONSEIL PERMANENT RÉSEAUX TECHNIQUES URBAINS (RTU) DU CERIU

Né de la mobilisation des acteurs du milieu, le Conseil permanent Réseaux techniques urbains (CPRTU) du CERIU encourage les meilleures pratiques de planification de travaux, de coordination des interventions et de construction de réseaux techniques urbains par des activités de sensibilisation, de discussion, de formation, de recherche, de veille, de développement et de transfert dans un cadre de développement durable de l'ensemble des infrastructures urbaines.

Les réseaux techniques urbains (RTU), anciennement désignés sous l'appellation utilités publiques, représentent l'ensemble des réseaux, souterrains ou aériens, de télécommunication et d'énergie (gaz, électricité et chauffage urbain).



Mise en garde :

Le CERIU n'assume aucune responsabilité quant à l'application de ce guide.

REMERCIEMENTS

Le CERIU tient à remercier chaleureusement les membres du comité de travail pour leur dévouement et leurs précieuses contributions à la réalisation et à la mise à jour de ce document.

L'ÉQUIPE

- Supervision par le **Conseil permanent Réseaux techniques urbains**
En collaboration avec le **Conseil permanent Infrastructures Souterraines**
- Coordination par :
Salamatou Modieli Amadou, ing., M.ing, PMP, coordonatrice de projets, CERIU
Michel Saindon, ing., chargé de projet, CERIU
- Recherche et rédaction :
Elyssa Cameroun et Alain Paquette, UQAM - Chaire de recherche sur la forêt urbaine

NOM COMPLET	ORGANISATION
Marc-André Baillargeon	CSEM
Orphé Beauchemin	Énergir
Marie Bernier-Roy	Soleno - représentante CP Infrastructures souterraines
Marie-Andrée Blouin	Ville de Montréal
Denis Bordeleau	Ambassadeur CERIU
Daniel Boyer	Ville de Laval
Maxime Cloutier	Hydro-Québec
Mylène Cyr	Ville de Laval
Natalia Da Costa Pacheco	Gazifère
Francine Dubeau	Ville de Montréal
Alexandre Dumas	Ville de Gatineau
Denise Fortin	Ville de Québec
Chloé Frédette	Québec vert
Généviève Gosselin	Firme Lemay
Amin Hammad	Université Concordia
Marc Jr Colas	Info-Excavation
Jean-François Lavoie	Vidéotron
Philippe Mandeville	Ville de Longueuil
Nancy Metcalfe	Ville de Laval
Jordan Paczos	Ville de Laval
Simon Péloquin	Hydro-Québec
Sébastien Piché	Énergir
Claude Proulx	Ville de Longueuil
Patrice Tétreault	Bell
Nancy Thériault	Ville de Trois-Rivières
Nadia Tizliouine	Ville de Québec
François Vaillancourt	CSEM
Alexandre Vézina	Stantec
Camille Zaroubi	

TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE EXÉCUTIF	V
CHAPITRE 1 – INTRODUCTION	1
1.1 Pourquoi devrions-nous ajouter plus d'arbre s'il y a une compétition pour l'espace?	1
1.2 Est-ce que les arbres et les réseaux souterrains coexistent actuellement?	3
1.3 Comment peut-on aligner des objectifs et des points de vue opposés?	4
CHAPITRE 2 – LE CONFLIT	5
2.1 Les racines des arbres en milieu urbain	5
2.2 Étendue, gravité et coût du conflit entre la végétation et les réseaux publics souterrains	9
2.3 L'impact de la végétation sur le réseau public souterrain	9
2.3.1 Les racines et le système d'égouts	10
2.3.2 Dommages mécaniques aux tuyaux et câbles	11
2.3.3 Obstruction d'accès et intégrité de la sécurité des services	15
2.4 L'impact du réseau public souterrain sur la végétation	16
2.4.1 Section des racines	16
2.4.2 Les réseaux de gaz naturel	18
2.4.3 Les autres réseaux	18
2.4.4 Le facteur humain	19
2.5 Coût du conflit	20
CHAPITRE 3 – SOLUTIONS ET RECOMMANDATIONS PROPOSÉES	25
3.1 Limiter l'impact de la section des racines	26
3.1.1 Distances minimales de sécurité - Zone de protection des arbres	26
3.1.2 L'utilisation des technologies sans tranchée	33
3.1.3 Recommandations générales suite d'une section accidentelle ou inévitable des racines	42
3.2 Limitation des conflits avec le réseau souterrain	44
3.2.1 Distances de plantation appropriées et sélection des espèces	44
3.2.2 Utilisation des tunnels, conduits et câbles partagés	46
3.2.3 Utilisation de barrières racinaires	48
3.2.4 Propositions pour de nouveaux designs de plantation	51
3.3 Recommandations pratiques pour limiter les conflits avec le système d'égouts	60
3.3.1 Stratégies réactives	60
3.3.2 Stratégies proactives	62
3.3.3 Espèces et distance	64
3.3.4 Attributs des conduites	66

3.4 Recommandations pratiques pour limiter les conflits avec le réseau de gaz naturel	67
---	----

CHAPITRE 4 – LACUNES DANS LES CONNAISSANCES EXISTANTES ET AXES DE RECHERCHE FUTURS SUGGÉRÉS **71**

4.1 1 ^{ère} partie : Portail de documentation des raisons d'intervention	72
---	----

4.2 2 ^e partie : Où sont les racines des arbres?	73
---	----

4.3 3 ^e partie : Analyses des pannes et interventions : identification des facteurs à risque et prédiction des interventions futures	73
---	----

RÉFÉRENCES **75**

SOMMAIRE EXÉCUTIF

1_ Introduction

L'environnement urbain connaît une croissance significative, accentuant la compétition pour la ressource cruciale qu'est l'espace, en particulier entre les réseaux publics souterrains et les arbres. Cette pression résulte de l'expansion des centres urbains et de la demande croissante de services écosystémiques fournis par les arbres pour atténuer les effets négatifs de la vie urbaine. Cette revue de littérature se concentre spécifiquement sur les conflits, les solutions et les recommandations de meilleures pratiques liés aux réseaux souterrains.

L'intégration de plus d'arbres en milieu urbain semble paradoxale face à la compétition pour l'espace souterrain. Cependant, les arbres urbains offrent une gamme d'avantages environnementaux, sociaux et économiques. Malgré une prise de conscience croissante de ces avantages, les initiatives actuelles se concentrent souvent uniquement sur l'aspect environnemental, créant des conflits potentiels à l'avenir. Il est essentiel de repenser la planification urbaine pour prendre en compte à la fois les réseaux souterrains et les arbres, garantissant une coexistence harmonieuse.

Le conflit entre les arbres et les réseaux souterrains est indéniable, mais il est souvent exacerbé par un manque de connaissances. Cette revue vise à combler ces lacunes en présentant une synthèse des informations existantes sur les causes des conflits et les moyens de les éviter à l'avenir.

Bien que les objectifs de plantation d'arbres et d'entretien des réseaux souterrains semblent parfois opposés, des solutions innovantes sont en cours de développement. L'objectif est de garantir la santé des arbres sans compromettre l'intégrité des réseaux souterrains.

2_ Conflit

En premier lieu, on examine nos connaissances réelles sur les racines des arbres en milieu urbain, considérées comme la principale source de conflits avec les réseaux souterrains. Les racines doivent composer avec des sols souvent difficiles, compactés, pauvres en éléments nutritifs et acides, rendant leur croissance complexe. Deux mythes communs sont également déboulonnés : les racines ne se limitent pas à la zone d'égouttement du houppier et se concentrent en réalité dans les premiers centimètres du sol.

Les racines sont influencées par divers facteurs tels que la sécheresse, l'engorgement, la salinité, la carence en éléments nutritifs, l'hypoxie et la compaction du sol. Elles sont attirées par les zones entourant les réseaux souterrains en raison d'un gradient d'eau croissant, entraînant des problèmes particuliers avec les canalisations d'égout riches en eau et en éléments nutritifs. La revue souligne également que la croissance racinaire se produit principalement dans les premiers centimètres du sol, et à des distances horizontales inconnues, remettant en question les recommandations actuelles sur la "zone de protection de l'arbre" basées sur la zone d'égouttement. Pour minimiser les conflits entre les arbres et les réseaux souterrains, il est essentiel de prendre en compte ces principes de base : la localisation des racines, la diversité des fonctions racinaires, l'impact du sectionnement sur différents types de racines, et la sensibilité des racines aux conditions environnementales.

L'impact du réseau public souterrain sur la végétation

L'impact du réseau public souterrain sur la végétation, en particulier les arbres, est principalement associé aux travaux de construction, d'installation et de réparation. Ces activités, telles que l'abattage d'arbres, la coupe de racines et les dommages mécaniques, peuvent entraîner un dépérissement des arbres, une diminution de leur santé et une instabilité structurelle. Peu de documents abordent directement les réseaux souterrains, mais la coupe des racines est identifiée comme l'impact négatif le plus important, entraînant une réduction de la croissance, un dépérissement et des changements physiologiques.

Des discussions sur la coupe des racines mettent en évidence que malgré la capacité des arbres à récupérer, l'environnement urbain limite souvent cette possibilité. Des études soulignent le manque de connaissance des arboristes quant à l'instabilité résultante des dommages souterrains, et la littérature existante se concentre davantage sur les effets immédiats que sur la stabilité à long terme. Concernant les réseaux de gaz naturel, les fuites de gaz sont identifiées comme la principale menace pour la santé des arbres. Ces fuites peuvent créer des sols appauvris en oxygène, simulant des conditions d'engorgement et de sécheresse, bien que rarement mortelles.

Le facteur humain contribue significativement aux dommages, avec des erreurs liées à un manque de formation, de planification inadéquate et à des politiques insuffisamment mises en œuvre. Des suggestions pour améliorer la situation incluent une communication accrue, une sensibilisation, une formation et des politiques plus strictes.

L'impact de la végétation sur le réseau public souterrain

Bien que la plupart des secteurs ne considèrent pas les arbres comme un problème majeur, les égouts sont particulièrement vulnérables à l'intrusion et aux dommages des racines. Les obstructions causées par les racines entraînent des blocages d'égouts, des débordements, des dommages structuraux, et d'autres problèmes. Les risques varient en fonction de facteurs tels que la distance entre les arbres et les conduits, l'âge du système d'égout, et le type de matériau des tuyaux.

De plus, la section aborde les dommages mécaniques aux tuyaux et câbles, expliquant comment les racines peuvent agir comme points d'ancrage, provoquant des ruptures de tuyaux lors d'événements venteux violents. Elle examine également d'autres sources de conflit, y compris l'obstruction de l'accès et son impact sur la sécurité des services. Bien que la végétation ne soit pas souvent la principale cause de problèmes pour les réseaux souterrains, elle peut entraîner des retards et des obstructions, notamment dans les secteurs des télécommunications, de l'électricité et du gaz. Les entreprises évitent généralement ces conflits potentiels en imposant une distance de plantation minimale, bien que cela puisse ne pas être la mesure la plus efficace pour limiter les conflits, comme le suggèrent certaines études financées par des entreprises du secteur.

Le coût du conflit

Une analyse approfondie de la gestion des arbres aux États-Unis révèle des budgets significatifs, représentant jusqu'à 52 % des budgets municipaux totaux en 2014. Les conflits avec les réseaux publics sont susceptibles d'influencer les dépenses les plus importantes, soulignant l'importance du coût dans la prise de décision. Les considérations financières limitent également les initiatives de verdissement urbain. Malgré la publication d'un guide soulignant l'importance de prendre en compte les coûts de réalisation et de maintenance, la question persiste. Cependant, des solutions sont proposées, notamment des études approfondies sur les coûts/bénéfices, la diffusion des études existantes, le développement de nouveaux programmes de financement et l'adaptation des critères d'admissibilité.

L'absence de détails sur les coûts dans la littérature complique l'estimation de l'ampleur des dommages résultant des conflits entre les arbres et les réseaux publics. Les entreprises hésitent souvent à adopter des stratégies préventives en raison de coûts apparents, soulignant le besoin d'études plus approfondies pour évaluer les coûts à long terme et favoriser des solutions rentables.

3_ Solutions et recommandations

La recherche de solutions pour atténuer les conflits entre les arbres en milieu urbain et les réseaux publics souterrains, bien que basée sur une compréhension des causes et des impacts, est confrontée à un manque d'études expérimentales. La plupart des informations soulignent la nécessité d'une planification avancée, d'une collaboration intersectorielle et d'une éducation. La planification doit anticiper la croissance à long terme des arbres à proximité des réseaux, avec une prise en compte active des arbres dès la conception des projets. La collaboration entre professionnels à toutes les phases d'un projet est cruciale pour concevoir des solutions bénéfiques et minimiser les dommages. La communication accrue entre les parties permettrait une coordination efficace des interventions, réduisant les tranchées répétées et limitant les dommages involontaires. Enfin, une éducation continue des travailleurs sur les chantiers, une sélection judicieuse des espèces, et des efforts de verdissement coordonnés contribueraient à atténuer l'impact des réseaux publics sur les forêts urbaines. La nécessité de changer fondamentalement les pratiques actuelles pour intégrer pleinement la planification simultanée des réseaux publics et des arbres est soulignée, tout comme l'importance de sensibiliser toutes les parties prenantes à l'importance de la préservation des arbres. La section aborde des solutions et recommandations portant à limiter 1) l'impact de la section des racines, 2) le conflit avec les réseaux (en général), 3) le conflit avec les égouts, et 4) le conflit avec le réseau de gaz naturel.

La section des racines émerge comme le principal défi pour la santé et la longévité des arbres dans le contexte des conflits avec les réseaux souterrains. Plusieurs stratégies visent à atténuer ce risque, dont l'évitement des zones riches en racines. Cependant, l'emplacement optimal reste débattu, avec des recommandations de distance variées. Les technologies sans tranchée se révèlent prometteuses pour réduire les dommages aux racines, bien qu'elles impliquent des coûts et des ajustements infrastructurels.

La création de zones de protection optimale des arbres (ZPO) est une recommandation courante, mais les distances minimales varient considérablement selon les sources. Des normes gouvernementales et municipales présentent également des divergences. Les technologies sans tranchée, en minimisant les perturbations des racines, offrent des avantages écologiques, mais nécessitent des investissements initiaux, des formations, et présentent des risques. Parmi les méthodes sans tranchée, le radar à pénétration de sol (GPR) et l'apprentissage automatique se distinguent. Le GPR peut localiser les racines, bien qu'avec des limites, et détecter d'autres réseaux souterrains. L'apprentissage automatique se profile comme une solution innovante pour anticiper les conflits.

Afin de réduire les conflits avec le réseau souterrain globalement, le texte souligne la nécessité de solutions intégrées pour minimiser les conflits entre les arbres et les réseaux souterrains, avec une emphase sur la recherche pratique et la collaboration communautaire pour des résultats durables. Précisément, quatre recommandations principales sont proposées :

- **Distances de plantation appropriées et sélection des espèces :** la sélection d'espèces joue un rôle crucial dans la limitation des conflits. Différentes espèces ont des architectures racinaires variées, et des études soulignent l'importance de la densité d'arbres pour prédire les risques d'obstruction des égouts. Des exemples d'espèces problématiques dans différentes régions sont cités.
- **Utilisation de tunnels, conduits et câbles partagés :** la suggestion d'utiliser des espaces partagés par des réseaux publics compatibles est présentée. Cette approche permettrait de minimiser l'espace souterrain dédié aux réseaux, mais des considérations sur la coordination, la communication et les coûts doivent être prises en compte.
- **Utilisation de barrières racinaires :** les barrières racinaires sont considérées comme une solution potentielle pour atténuer les conflits. Elles consistent en des membranes ou des matériaux spéciaux visant à rediriger ou à freiner la croissance des racines. Cependant, des défis tels que l'efficacité, l'entretien, les coûts et la compression des racines sont à considérer.
- **Propositions de quatre nouvelles stratégies de design de plantation**
 - Séparation des arbres et des réseaux le long d'un axe vertical : en passant les câbles et tuyaux directement sous les arbres, cette méthode vise à minimiser les contacts racine/tuyau, mais nécessite des recherches pratiques pour évaluer son efficacité.
 - Séparation des arbres et des réseaux le long d'un axe horizontal : cette méthode traditionnelle implique la division horizontale de l'espace en un corridor utilitaire et un corridor arboré.
 - Utilisation des arbres en pots et des sols structuraux : les bacs à plantes et les sols structuraux sont proposés pour limiter les conflits. Cependant, la recherche sur leur efficacité est limitée, nécessitant des études approfondies.
 - Modèle Deep City : ce modèle propose une approche 3D pour la planification urbaine, intégrant les ressources dans l'espace, les géomatériaux, l'eau souterraine et la géothermie. Il vise à équilibrer l'aménagement du territoire avec l'équilibre environnemental.

Au sujet des conflits entre les racines des arbres et les systèmes d'égouts urbains, quatre thèmes clés pour minimiser les interactions sont identifiés:

- **Stratégies réactives:** en raison de contraintes budgétaires et de la complexité des systèmes d'égouts urbains, de nombreuses villes adoptent des stratégies réactives. Ces approches, bien qu'efficaces à court terme, ne s'attaquent pas aux causes profondes des problèmes. Le contrôle mécanique et chimique des racines dans les conduites est abordé, avec des études évaluant l'efficacité de différentes méthodes.
- **Stratégies proactives:** le texte préconise l'adoption de stratégies proactives, comprenant une planification appropriée lors de la conception des réseaux d'égouts et des inspections régulières. Des facteurs tels que la sélection des espèces, la distance de plantation, et la qualité des conduites sont examinés. Des mesures proactives, telles que l'inspection minutieuse des joints et l'amélioration des politiques, sont également recommandées.
- **Espèces et distance:** l'importance de la communication entre les acteurs impliqués dans la plantation d'arbres et l'entretien des réseaux d'assainissement est soulignée. Les études examinent également les espèces d'arbres les plus susceptibles de causer des obstructions. Des recommandations de distances de plantation sécuritaires sont fournies, basées sur des études internationales.
- **Attributs des conduites:** la vulnérabilité des conduites aux intrusions racinaires est discutée, avec des informations sur les caractéristiques des conduites les plus susceptibles de causer des obstructions. Des considérations sur l'âge des tuyaux et les dimensions sont également présentées.

4. Lacunes dans les connaissances et axes de recherche futurs

Cette revue de littérature met en lumière les nombreuses lacunes dans la compréhension de la relation entre les réseaux souterrains et la végétation, en particulier dans les contextes urbains. Les recherches existantes, souvent centrées sur le réseau sanitaire, présentent des limitations, rendant difficile l'extrapolation des résultats à d'autres contextes. Les connaissances sur le comportement, les mécanismes et la survie des racines dans les sols urbains, ainsi que leur interaction avec les réseaux souterrains, sont notoirement insuffisantes, basées principalement sur des informations empiriques ou des opinions d'experts.

Identifiant six lacunes cruciales, cette revue souligne l'importance de combler ces vides de connaissances pour mieux planifier l'urbanisme et minimiser les conflits futurs. Ces lacunes comprennent : le comportement des racines et leur impact sur les réseaux, l'effet des infrastructures sur les arbres, les techniques de plantation efficaces, les effets à long terme de la croissance des arbres, les directives spécifiques aux espèces, et les effets cumulatifs des arbres et des réseaux.

Pour remédier à ces lacunes, le document propose un projet de recherche en trois parties, incluant un portail de documentation des interventions, une étude approfondie sur l'architecture racinaire urbaine, et l'utilisation d'un Système d'Information Géographique (SIG) pour prédire les zones à risque.

L'approche graduelle proposée vise à simplifier les coûts tout en produisant des résultats significatifs à chaque étape. En soulignant l'urgence de ces initiatives, le document insiste sur la nécessité d'une coordination entre les entreprises de services publics. En résumé, le document met en évidence l'urgence de combler les lacunes de connaissances pour assurer la durabilité et la fonctionnalité des espaces urbains, proposant des avenues de recherche spécifiques pour aborder ces défis complexes.

CHAPITRE 1 — INTRODUCTION

L'environnement urbain a connu un essor considérable dans les dernières années, entraînant une intensification de la concurrence entre divers acteurs pour la ressource la plus recherchée : l'espace. À mesure que de plus en plus de personnes migrent vers les villes, la pression sur l'infrastructure (réseau public) nécessaire pour les accueillir s'accroît, tant en termes de magnitude que de robustesse. Parallèlement, il y a une demande croissante pour des services écosystémiques (arbres) qui contribuent à atténuer et à éliminer certains des aspects négatifs de la vie en ville, tels que les îlots de chaleur, la pollution, les inondations, les problèmes de santé, pour n'en citer que quelques-uns. Par conséquent, il existe un besoin croissant de gestion adéquate de la forêt urbaine qui puisse concilier ces deux ressources essentielles : les réseaux publics et les arbres en ville.

Pour aborder ce problème, une vaste revue de la littérature a été menée en utilisant à la fois des sources scientifiques et de la littérature grise. La portée de cette revue était limitée aux conflits, aux solutions et aux recommandations de meilleures pratiques concernant les réseaux souterrains seulement. Nous avons également exclu la littérature traitant des conflits entre les arbres/leurs racines et les surfaces perméables et les bâtiments, ainsi que la littérature sur l'infrastructure gris-vert. Le document suivant présente un résumé des informations trouvées et vise à fournir des orientations et des recommandations générales qui pourraient être utilisées lors de l'élaboration d'un guide de bonnes pratiques par le comité.

1.1_ Pourquoi devrions-nous ajouter plus d'arbres s'il y a une compétition pour l'espace?

L'environnement urbain présente un ensemble de défis uniques pour la gestion des réseaux publics et des arbres. Tous ceux travaillant dans la gestion urbaine reconnaissent qu'il existe un conflit élevé pour l'espace entre les arbres et les réseaux publics souterrains (Chapman, 1982). Dans de nombreux cas, le conflit actuel découle de la nécessité d'agrandir les centres urbains et d'accueillir davantage de résidents, de sorte que les arbres plantés à une époque où la demande d'espace urbain était moindre peuvent maintenant devenir « problématiques » (Jim, 1998). Associée à cela, il y a la volonté de planter davantage d'arbres (Sousa-Silva et al., 2023) malgré l'augmentation importante des surfaces imperméables et de l'infrastructure, ce qui peut exercer un stress accru sur les arbres eux-mêmes (Mullaney et al., 2015). Cette combinaison indique un conflit encore plus important avec les arbres - ainsi, nous pourrions nous demander: si la concurrence pour l'espace souterrain est si intense, pourquoi ajoutons-nous plus d'arbres?

Les arbres urbains et les espaces verts sont une ressource inestimable, et à ce titre, nous devons développer des solutions et de meilleures pratiques pour permettre la coexistence des arbres et des services publics. Alors que le changement climatique continue d'impacter la santé, la sécurité et la qualité de vie des habitants des zones urbaines à travers le monde, les arbres demeurent un outil important pour atténuer ces effets néfastes (Nowak & Dwyer, 2000). Les arbres dans les environnements urbains offrent une multitude d'avantages et de services essentiels, améliorant la qualité de vie des citoyens (Borelli et al., 2023; Turner-Skoff & Cavender, 2019; Wolf et al., 2020). La littérature scientifique démontre largement leurs avantages multiples. Au-delà de leur valeur esthétique, les arbres procurent des bénéfices environnementaux inestimables en atténuant les îlots de chaleur urbains grâce à leur ombre et en réduisant les températures atmosphériques. Ils jouent un rôle essentiel dans la purification de l'air en absorbant les polluants et en relâchant de l'oxygène, améliorant ainsi la qualité de l'air. De plus, leur canopée intercepte les précipitations, réduisant les ruissellements urbains et la pression sur les systèmes de drainage tout en aidant à prévenir l'érosion du sol. Les arbres favorisent la biodiversité en offrant des habitats à diverses espèces sauvages et contribuent au bien-être psychologique et physiologique en réduisant le stress, en améliorant la santé mentale et en favorisant l'activité physique. Leur présence dans les paysages urbains contribue significativement à la cohésion communautaire, encourageant les interactions sociales et créant des espaces visuellement attrayants qui augmentent la valeur des propriétés. Globalement, la littérature scientifique met en évidence les nombreux et importants avantages offerts par les arbres dans les environnements urbains, faisant d'eux des éléments indispensables pour des villes durables et saines (Borelli et al., 2023; Turner-Skoff & Cavender, 2019; Wolf et al., 2020).

Durant les trente dernières années, nous avons également observé un changement dans la perception des arbres, passant d'éléments conçus pour l'esthétique à ceux conçus pour les services (Mullaney et al., 2015) - et cette reconnaissance souligne l'importance d'ajouter de nouveaux arbres et de maintenir ceux déjà existants au sein de l'environnement urbain. Tous les bénéfices apportés par les arbres renforcent la nécessité de les protéger contre les activités de construction (Prax & Ermák, 2004).

En raison de ces avantages, les initiatives de végétalisation et de plantation ont connu un énorme essor, toutes dans le but de lutter contre les effets négatifs de l'urbanisation et du changement climatique (Limoges et al., 2018; Smith et al., 2019; Sousa-Silva et al., 2023). Parallèlement, des guides de bonnes pratiques sur la plantation et l'entretien des arbres en milieu urbain ont été élaborés pour garantir l'obtention d'un maximum d'avantages (Deshaies et al., 2021; Frédette, 2023; Frédette & Trickey-Massé, 2023; Nicklin et al., 2013; Tanguy et al., 2002). Le problème est que la plupart de ces initiatives et guides se concentrent uniquement sur l'aspect « végétalisation » ou « environnemental », ce qui entraîne des conflits inévitables à l'avenir. Strom (2000) a dit parfaitement : « La plupart des communautés n'ont pas planifié leur forêt urbaine; elle s'est simplement produite ». Par conséquent, les arbres ne sont pas souvent pris en compte par rapport à l'infrastructure existante ni en ce qui concerne le développement à long terme des arbres eux-mêmes (et de leurs besoins évolutifs). Cela soulève des problèmes de responsabilité (qui devrait en être chargé), d'entretien et de suivi (évaluation des risques actuels et futurs), de coûts (qui devrait assumer les frais) et de services (maintenance ou réduction des services fournis par les arbres et les réseaux). Pour en éviter, la planification urbaine devrait pouvoir prendre en compte plusieurs éléments à la fois, ainsi que des objectifs de tous les différents propriétaires et acteurs concernés (Strom, 2000). Nous devons commencer à penser à long terme et de manière multisectorielle en ce qui concerne la plantation d'arbres si nous voulons continuer à bénéficier de leurs services à l'avenir. Cette revue de la littérature présentera quelques solutions possibles quant à la manière dont cela pourrait être réalisé.

1.2_ Est-ce que les arbres et les réseaux souterrains coexistent actuellement?

Il est indéniable qu'il existe un conflit entre les arbres et les réseaux souterrains. Les arbres et leurs systèmes racinaires peuvent être endommagés par les travaux d'installation et de réparation (Hetherington, 1994; Jim, 1998a) et, à leur tour, les réseaux peuvent être endommagés par ces mêmes racines (Mattheck & Bethge, 1999; Randrup et al., 2001). Cependant, le principal conflit réside dans le manque de compréhension, d'information et de recherche sur le sujet, entraînant un conflit perçu qui pourrait être évité (ou du moins limité) grâce à une meilleure gestion et planification (Garrick & Garrick, 2018; Jim, 1998; Shi et al., 2023; Watson et al., 2014). Un aperçu graphique de ces conflits, tiré de Shi et al. 2023, illustre les facteurs principaux qui les entraînent (Fig. 1).

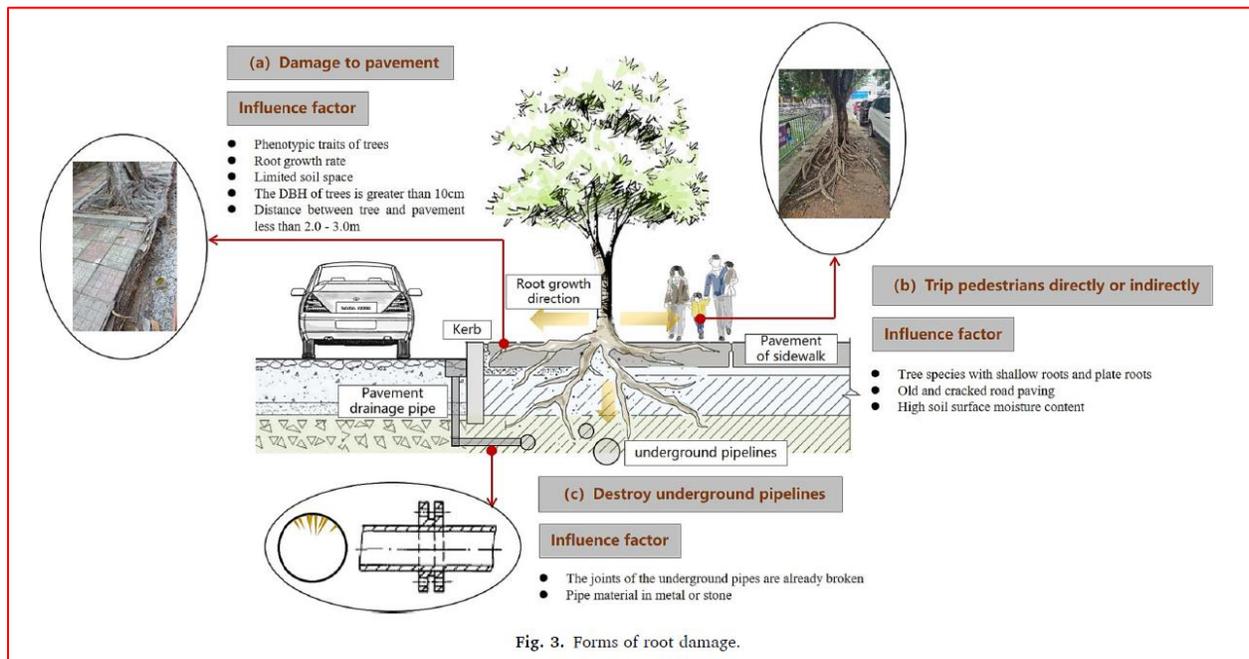


Figure 1 : Représentation graphique des principaux conflits avec les racines ainsi que de leurs principaux facteurs (Shi et al. 2023; Fig. 3)

Lors d'une réunion conjointe à l'Université York avec des arboriculteurs et des grandes entreprises de réseaux publics, il a été répété dans les différents secteurs que, bien que des conflits surviennent entre les arbres et les réseaux, avec un peu de réflexion et de planification, ces conflits seraient négligeables (Chapman, 1982). Ce sentiment a été confirmé par une enquête menée au Royaume-Uni à la suite de la perte d'arbres lors de l'installation de câbles de télécommunication (Slater & Chalmers, 2022). Même du point de vue des citoyens, plusieurs études menées aux États-Unis ont révélé que la plupart des résidents estimaient que les avantages des arbres de rue l'emportaient sur les conflits potentiels - y compris ceux liés aux trottoirs fissurés et aux dommages aux bâtiments/aux routes (Mullaney et al., 2015). Allant encore plus loin, une étude a également découvert que les gens étaient prêts à payer davantage d'impôts si cela signifiait qu'ils auraient accès à davantage de parcs urbains boisés et d'espaces verts (Nowak & Dwyer, 2000). Par conséquent, le désir de voir les arbres et les réseaux coexister est clairement présent, mais nous manquons simplement des outils nécessaires pour le faire efficacement. Dans les sections suivantes, nous visons à combler certaines de ces lacunes de connaissances en présentant une synthèse de toutes les informations connues sur les causes de ces conflits et sur la manière de les éviter à l'avenir.

1.3_ Comment peut-on aligner des objectifs et des points de vue opposés?

Il peut être facile de supposer qu'en raison des objectifs quelque peu "opposés" entre la plantation d'arbres et l'installation et la maintenance des réseaux, le partage de l'espace souterrain serait impossible. Certes, la plupart des objectifs forestiers en milieu urbain nécessiteront des solutions innovantes pour surmonter les défis d'espace de l'environnement urbain (Jim, 2019), mais déjà des avancées positives sont en cours - tant en termes de technologies proposées que de solutions (Jung & Sinha, 2007; Shi et al., 2023). L'objectif de ce "partage d'objectif" n'est pas de favoriser l'un au détriment de l'autre, mais plutôt de trouver un terrain d'entente. Nous voulons garantir la santé et la survie des arbres sans avoir un impact trop important (en termes de temps et d'argent) sur les réseaux souterrains, qui sont également un élément nécessaire d'une vie urbaine saine.

Pour un exemple extrême d'objectifs opposés, nous pouvons regarder la situation à Hong Kong. Ici, pour éviter tout conflit, les arbres sont automatiquement relégués en bas de la priorité et aucun effort n'est fait de la part de l'entrepreneur pour éviter ou protéger les arbres situés dans le "chemin de moindre résistance" (Jim, 1998a, 1998b). La pression pour se développer et s'étendre est si intense que le besoin immédiat en réseaux souterrains favorise l'adoption de pratiques "droite ligne, distance la plus courte, coût le plus bas" et est réalisée sans planification future, de sorte que les mêmes sites sont régulièrement excavés - entraînant un immense stress et une perte d'arbres (Jim, 1998a, 2003). Dans ce cas, le besoin de nouveaux arbres vient en second plan et finit par coûter plus cher que la préservation initiale - sans pour autant résoudre les conflits potentiels à venir (Jim, 1998b).

Cette situation ne représente pas la norme dans les villes nord-américaines et européennes, mais elle illustre les dangers de donner la priorité à un besoin par rapport à un autre. Il est impératif d'opter pour des pratiques et des solutions permettant aux arbres et aux réseaux de partager l'espace tout en tenant compte des points de vue des deux parties. Sans cela, la pérennité sera difficile à maintenir.

CHAPITRE 2 — LE CONFLIT

Comme déjà discuté, la compétition pour l'espace est l'un des principaux moteurs de conflit entre les arbres et les réseaux souterrains, mais d'autres facteurs jouent également un rôle important. Si nous espérons mieux prédire et gérer ces conflits, nous devons d'abord comprendre pourquoi ils se produisent, à quelle fréquence, et quelles en sont les conséquences directes et indirectes. Cette section vise à fournir un aperçu général du problème ; les recommandations seront discutées dans la section suivante.

2.1_ Les racines des arbres en milieu urbain

La plupart des conflits, sinon tous, entre les arbres et les réseaux sont liés aux racines. Il est donc d'abord pertinent de considérer comment les racines se comportent dans l'environnement urbain et quels problèmes sous-jacents peuvent déclencher le conflit. Les racines doivent composer avec un sol extrêmement compacté, pauvre en éléments nutritifs, souvent gorgé d'eau et hautement acide (Roberts et al., 2006 ; Day et al., 2010b ; Mullaney et al., 2015). De plus, en raison des constructions et développements répétés, il peut rester très peu de terre végétale ou de sol naturel près des arbres (Randrup & Mcpherson, 2001 ; Watson et al., 2014). Ces caractéristiques du sol rendent la croissance des racines difficile et alimentent le mythe selon lequel les racines « cherchent » les réseaux et infrastructures souterrains.

Les racines sont opportunistes et poussent là où les conditions sont les plus favorables : là où elles ne sont pas limitées par la sécheresse, l'engorgement, la salinité, la carence en éléments nutritifs, l'hypoxie, la contamination du sol et/ou la compaction du sol (Day et al., 2010b ; Mullaney et al., 2015 ; Prax & Ermák, 2004). Dans de nombreux cas, les zones entourant les réseaux souterrains présentent un gradient d'eau croissant (Day et al., 2010b ; Randrup et al., 2001), attirant les racines vers eux, que ce soit par la condensation ou la présence d'eau dans les canalisations d'égout (Mullaney et al., 2015). Les canalisations d'égout sont particulièrement touchées par ce problème d'intrusion des racines, car non seulement elles sont riches en eau, mais aussi en éléments nutritifs, et une fois que les racines ont trouvé ce site de croissance optimal, elles prolifèrent (Comery, 2000 ; Kuliczowska & Parka, 2017 ; Pohls et al., 2004 ; Prax & Ermák, 2004). Quelques moyens possibles pour limiter ou éviter ces interactions seront discutés.

Un autre mythe courant et toujours largement supposé aujourd'hui est que les racines se trouvent principalement dans la zone d'égouttement du houppier et concentrent leurs efforts sur la croissance verticale (Roberts et al. 2006). Les défis associés à l'étude de l'architecture, de la propagation et de la croissance des racines d'arbres, en particulier dans l'environnement urbain, ont fait en sorte que pendant de nombreuses décennies, cette croyance était courante (Day et al., 2010a, 2010b) - ce qui rendait l'utilisation de tranchées à proximité des troncs d'arbres une méthode acceptable d'intervention pour les réseaux (Jim, 1998b, 2003). Cependant, nous savons maintenant que cela est inexact. Bien qu'il y ait encore des incohérences quant à la profondeur exacte (Day et al., 2010a), la plupart de la littérature scientifique indique que les systèmes racinaires des arbres se trouvent principalement dans le premier mètre du sol (environ 90% ; Jim, 1998a, 2003). Certains vont même jusqu'à dire qu'une partie significative

pousse dans les premiers 0-30 cm de sol (Shi et al., 2023), que 80% poussent dans les 10 premiers centimètres (BNQ, 2018) ou qu'environ 70% sont dans les 50 premiers centimètres (Mullaney et al., 2015), car c'est là que la plupart de leurs nutriments et de l'oxygène nécessaires peuvent être trouvés (BNQ, 2018 ; Mullaney et al., 2015 ; Shi et al., 2023). En réalité, seules les racines formées en premier croissent sous l'influence de la gravité (Perry, 1969).

De plus, bien que les racines aient le potentiel d'atteindre une profondeur de 2 mètres, la majeure partie de la propagation racinaire se produit horizontalement sur une distance allant jusqu'à 10 mètres (Perry, 1969), bien que les distances exactes varient également (Day et al., 2010a). Une étude de Mattheck et al. (1999) a constaté que selon l'espèce, les racines pourraient avoir un impact sur les briques et les petites infrastructures à une distance de 10 à 40 mètres. D'autres études examinant les égouts suggèrent que les racines jusqu'à 6 mètres de la base de l'arbre peuvent poser un problème (Pohls et al., 2004 ; Randrup, 2000), mais la propagation réelle des racines serait encore plus importante. Une revue a également conclu qu'une bonne règle était de supposer que la propagation racinaire était approximativement égale à la hauteur de l'arbre - plutôt qu'au rayon de la couronne / de la zone d'égouttement de l'arbre (Watson et al., 2014). Une autre a constaté que certaines espèces peuvent avoir jusqu'à 77 % (peuplier), 59 % (robinier) ou 52 % (frêne) de leur longueur totale de racines située en dehors de la zone d'égouttement de l'arbre (Schnelle et al., 1989). Finalement, Comery (2000) écrit que la propagation typique des racines peut être jusqu'à 2 fois la hauteur de l'arbre, bien que la masse essentielle soit généralement considérée sous le houppier de l'arbre. Il était donc surprenant que malgré la prévalence de la stratégie de "zone de protection de l'arbre" pour limiter les impacts des travaux de tranchées et de construction sur les arbres, nous n'ayons trouvé aucune étude examinant quantitativement la distance jusqu'à laquelle les racines poussent dans les environnements urbains, ou quel pourcentage de la masse racinaire se trouve à quelle distance. Il n'est donc pas clair sur quoi exactement reposent les recommandations actuelles de "zone de protection de l'arbre", dont il existe plusieurs, et par conséquent, lesquelles devraient être privilégiées. Cela sera exploré plus en détail dans la section des solutions et recommandations proposées. Une représentation du « concept racinaire moderne » est présentée à la Fig. 2.

Malgré l'étendue exacte inconnue, la croissance radiale se propageant juste sous la surface dans toutes les directions à partir de la base de l'arbre est ce à quoi nous nous attendrions avec les arbres urbains, mais dans la plupart des cas, les racines finiront par rencontrer un obstacle ou une barrière qui déviera leur croissance de manière "inattendue" (Day et al., 2010b). Une étude du système racinaire d'un *Ulmus pumila* à Montréal en 2015 a trouvé des racines sur plusieurs mètres horizontalement, leur propagation latérale s'arrêtant uniquement en raison de l'obstacle d'une barrière physique (trottoir) - après quoi elles ont continué à croître en parallèle (communication Guillaume Couture, 2015). Il n'est donc pas toujours simple de contourner et d'éviter les systèmes racinaires des arbres, voire de prédire où ils pourraient se trouver, mais quelques solutions possibles seront discutées. Cette compréhension de base est cependant impérative pour établir des zones de protection d'arbres efficaces ; par conséquent, il reste encore beaucoup de travail à faire.

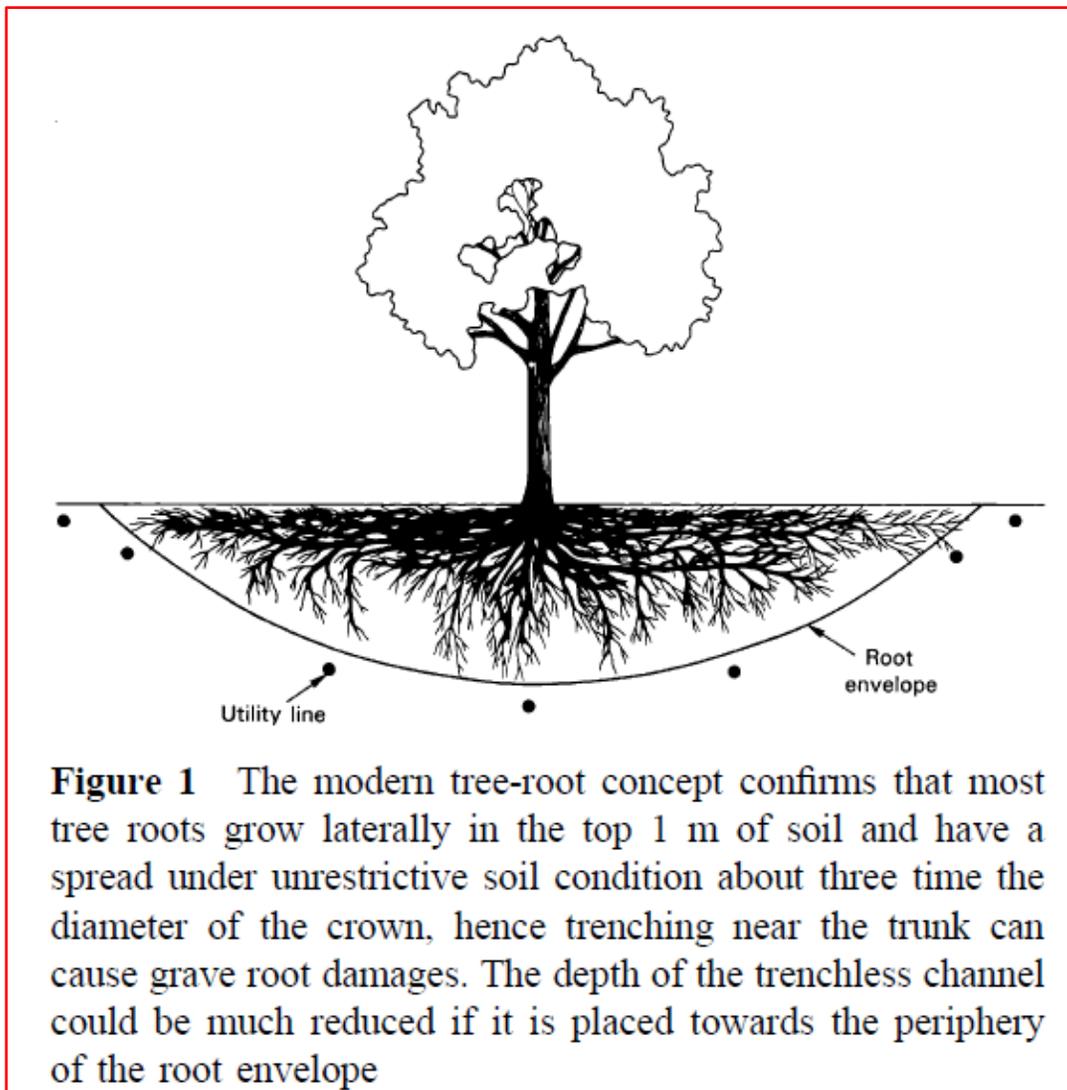


Figure 1 The modern tree-root concept confirms that most tree roots grow laterally in the top 1 m of soil and have a spread under unrestrictive soil condition about three time the diameter of the crown, hence trenching near the trunk can cause grave root damages. The depth of the trenchless channel could be much reduced if it is placed towards the periphery of the root envelope

Figure 2 : Représentation du concept racinaire moderne des arbres urbains (Jim 2003; Fig. 1)

Lors de l'examen de l'architecture du système racinaire d'un arbre, il est également important de déboulonner l'idée que toutes les racines sont identiques et peuvent donc être traitées de la même manière. Différentes racines remplissent différentes fonctions : certaines sont responsables de l'ancrage et du soutien, du transport et du stockage des nutriments, ou de la recherche d'eau et de nutriments (Day et al., 2010b). Une bonne illustration des types et fonctions des racines urbaines (Fig. 3) est tirée de Yusufu Kachaka (2021). Ceux responsables de l'ancrage sont les plus grandes racines, situées le plus près de la base de l'arbre, et sont les plus sensibles / impactées par les dommages (Watson et al., 2014). Les racines nutritives sont plus petites et s'étendent beaucoup plus loin de la base de l'arbre ; elles réagissent généralement beaucoup plus favorablement aux dommages s'il y a une coupe nette (Fini et al., 2013, 2020 ; Watson et al., 2014). Différents types de racines posent différents problèmes pour les réseaux (Day et al., 2010a ; Mattheck & Bethge, 1999) et nécessiteraient donc différentes techniques/solutions d'intervention. Celles-ci seront explorées à la fois en termes de causes de conflit et de solutions.

Le système racinaire des arbres comporte trois principales catégories de racines (Figure 2) :

- **Les charpentières** : ce sont des racines latérales servant à l'ancrage, à l'exploration du sol ainsi qu'au stockage et transport de l'eau et des nutriments.
- **Les racines pivotantes** : ce sont les racines profondes ayant pour principales fonctions d'assurer l'ancrage de l'arbre, mais également de puiser en profondeur ainsi que de stocker l'eau et les nutriments du sol.
- **Les racines fines (ou chevelu racinaire)** : ce sont des racines non ligneuses ayant pour principale fonction le prélèvement de l'eau et des nutriments du sol.

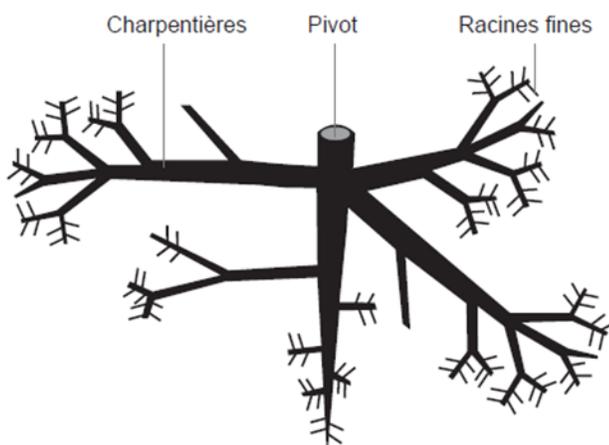


Figure 2. Architecture racinaire

Figure 3 : Illustration des différents types de racines (Yusufu Kachaka, 2021; Fig. 2)

Pour limiter au mieux le conflit entre les arbres et les réseaux souterrains, nous devons donc garder à l'esprit ces principes de base :

- La majorité des racines d'arbres se trouvent dans le premier mètre de sol ;
- La véritable distance d'extension des racines est inconnue ce qui pourrait influencer l'efficacité des différentes recommandations de zones de protection des arbres ;
- Les racines plus grandes, responsables de l'ancrage et de la stabilité, sont situées plus près des troncs d'arbres ; leur sectionnement est plus susceptible de causer des problèmes ;
- Les racines plus petites, responsables de la recherche et du transport de l'eau et des nutriments, sont censées mieux tolérer le sectionnement dans certaines conditions ;
- Les obstacles et les barrières peuvent dévier la croissance des racines, les amenant à dévier du modèle de croissance attendu ;
- Les racines sont sensibles à l'oxygène, à l'eau et aux carences en nutriments et se propageront donc vers des conditions de croissance plus idéales.

2.2_ Étendue, gravité et coût du conflit entre la végétation et les réseaux publics souterrains

Lors de l'étude du champ et de la gravité du conflit entre les arbres et les réseaux souterrains, il est apparu clairement que le manque de connaissances, de planification et de coordination contribuait tous au problème. Certaines solutions potentielles à ce conflit seront explorées dans la section suivante, mais ici nous nous concentrerons sur l'impact et le coût.

Globalement, la recherche sur ce conflit n'est pas répartie de manière équilibrée entre tous les secteurs des services publics. La plupart des études de cette revue concernent les systèmes d'eau/égouts, avec seulement quelques exemples des perspectives du gaz et des télécommunications. Cela ne signifie pas nécessairement que le problème est plus prévalent/impactant pour les égouts que pour les autres domaines, mais simplement que plus de temps et de ressources ont été investis pour mieux comprendre le problème. Il existe un potentiel de conflit avec tous les réseaux souterrains (Chapman, 1982), ce qui est un facteur déterminant dans le développement et l'utilisation de produits et technologies de mitigation, de surveillance et de protection des racines (Alani & Lantini, 2020 ; Jung & Sinha, 2007 ; Morgenroth, 2008 ; Nichols et al., 2017). De plus, les principaux coûts associés à ce conflit (maintenance et réparation, retards, surveillance continue, mise en œuvre de techniques "plus lentes" telles que le creusage manuel, etc.) sont universels à travers les secteurs, car ils surviennent généralement lors de l'installation ou de l'accès aux réseaux (Garrick, 2018 ; Jim, 2003 ; Jung & Sinha, 2007).

À Montréal, 3477, 3880, 3159 et 2311 interventions ont été approuvées et entreprises pour chaque année de 2020 à 2023 respectivement (données de la Ville de Montréal, 2023), et cela, dans tous les secteurs. Bien que les données sur la raison des interventions soient manquantes (c'est-à-dire si elles résultent d'un conflit avec un arbre ou non), chaque intervention impose des coûts supplémentaires aux réseaux et augmente le potentiel de dommages aux arbres. Limiter le nombre total d'interventions nécessaires est donc une priorité élevée. Pour ce faire, nous devons mieux comprendre exactement comment les arbres impactent les réseaux souterrains, et vice versa, et comment ces interactions sont liées au coût.

2.3 L'impact de la végétation sur le réseau public souterrain

Du point de vue de l'impact sur les réseaux souterrains, les racines sont la principale source de conflit. La plupart de ces interactions négatives peuvent s'expliquer par l'une des trois causes suivantes : la proximité, la disponibilité en eau ou en nutriments, et/ou l'ancrage (comme discuté précédemment). De plus, la plupart des secteurs ne considèrent pas les arbres comme un problème majeur, mais reconnaissent la relation potentiellement conflictuelle entre les deux (Chapman, 1982). L'exception est le réseau des eaux usées qui fait régulièrement face à l'intrusion et aux dommages des racines (Marlow et al., 2011). Pourtant, même ici, les praticiens ne considèrent pas souvent les racines/arbres comme un problème majeur et estiment qu'avec quelques changements clés et des améliorations, les conflits pourraient être encore réduits (Chapman, 1982 ; Randrup, 2000) - ceux-ci seront présentés plus en détail dans la Section 3.3.

Outre l'intrusion des racines, d'autres sources de conflit incluent les dommages mécaniques aux tuyaux et câbles, l'obstruction de l'accès et l'impact sur la sécurité et l'intégrité du service. De plus, Comery (2000) suggère que, dans de nombreuses circonstances, les arbres ne sont pas vraiment responsables des dommages aux infrastructures, surtout si une gestion appropriée, un entretien et une prévoyance sont mis en place ; mais le bombardement de poursuites met tout le monde sur la défensive. Les solutions et recommandations proposées à ces conflits seront discutées dans la Section 3.

2.3.1_ Les racines et le système d'égouts

Les réseaux d'égouts sont une infrastructure importante dans les villes urbaines, et garantir leur entretien et leur bon fonctionnement est une priorité élevée. Ils arrivent juste derrière les systèmes d'eau potable dans les villes (Obradović, 2017), mais leur conception les rend particulièrement vulnérables aux obstructions, surtout les systèmes anciens qui privilégiaient l'utilisation de tuyaux en argile et de joints ouverts (Chapman, 1982 ; Randrup et al., 2001). Bien que ce soient traditionnellement les systèmes à base d'argile et de brique qui soient les plus vulnérables (Kuliczowska & Parka, 2017 ; Obradović, 2017), les tuyaux modernes en PVC ne sont pas imperméables à l'intrusion des racines (Alani & Lantini, 2020 ; Kuliczowska & Parka, 2017 ; Ridgers et al., 2006). Les obstructions causées par les racines peuvent entraîner des blocages d'égouts, des débordements, des dommages structuraux, la formation de bassins septiques, une perte de vitesse et de capacité hydraulique, ainsi que des infiltrations dans les sols et les nappes phréatiques avoisinantes (Obradović, 2017 ; Randrup et al., 2001 ; Shi et al., 2023). Bien que les racines contribuent directement au problème en pénétrant dans les tuyaux et en proliférant à l'intérieur, elles causent également des effets indirects tels que l'élargissement du défaut initial permettant finalement à du sable et à du sol d'entrer et à des eaux usées de s'échapper (Randrup et al., 2001). La présence de racines peut également aggraver les impacts négatifs causés par des objets physiques, des accumulations de graisses, d'huiles et de matières grasses, ainsi que des dépôts de sédiments (Desilva et al., 2011 ; Randrup et al., 2001).

Les obstructions sont un problème courant à travers le monde et peuvent être à la fois persistantes et coûteuses (Ridgers et al., 2006 ; Shi et al., 2023). Aux États-Unis, on estime que 50 % de toutes les obstructions et défaillances structurales sont liées aux racines, ce qui se traduit par environ 50 ruptures majeures de conduites principales pour 1 650 km/an et environ 500 arrêts pour 1 600 km/an (Randrup et al., 2001). Les États-Unis signalent au moins 150 000 blocages d'égouts par an, tandis que le Royaume-Uni en signale environ 200 000 (Randrup et al., 2001). Au Danemark, 1,1 km de canalisations par an par ville devaient avoir des racines retirées (Randrup, 2000). Une étude suédoise a constaté que 99 % de ses villes enquêtées étaient affectées par les racines dans les systèmes d'égouts (Stål, 1998), et une autre a déterminé que 6,47 m pour 100 m de tuyauterie étaient concernés par les racines (Östberg et al., 2012). En Australie, Sydney signale environ 50 obstructions/km de tuyau par an, contre une moyenne australienne de 40 obstructions/km de tuyau par an (Ossola et al., 2023). En termes d'obstructions signalées par différentes entreprises, une étude a montré que 50 à 95 % de toutes les obstructions signalées étaient liées aux racines selon l'entreprise (Desilva et al., 2011). Une autre a constaté que la plupart des entreprises signalaient que plus de 75 % des obstructions étaient causées par les racines, une seule rapportant moins de 50 % (Marlow et

al., 2011). Ainsi, l'intrusion des racines est un problème universel, et la gestion des obstructions peut poser un défi opérationnel significatif (Marlow et al., 2011).

Les égouts offrent des environnements riches en eau et en nutriments (surtout par rapport à l'environnement urbain environnant) qui, une fois découverts, incitent les racines à proliférer rapidement pour exploiter pleinement la ressource (Ridgers et al., 2006). De plus, la forte condensation à l'extérieur des tuyaux d'égouts incite les racines à suivre la longueur du tuyau jusqu'à ce qu'elles trouvent une ouverture (Alani & Lantini, 2020 ; Randrup et al., 2001 ; Roberts et al. 2006). Cela augmente également le risque que les racines exercent une pression supplémentaire sur les tuyaux lors de leur croissance (voir 2.3.2), mais cela est peu probable avec les tuyaux modernes (Alani & Lantini, 2020). Les racines sont donc capables d'exploiter toute faiblesse ou tout défaut pouvant être présent dans le système.

Cependant, bien que les mécanismes derrière l'intrusion des racines soient largement biologiques, certains facteurs contribuent à sa probabilité. La distance entre les arbres et les conduits en est un, une étude signalant que 75 % de toutes les obstructions surviennent avec des arbres à 6 m ou moins (Pohls et al., 2004), et une autre constatant 48 % dans un rayon de 3 m et 44 % entre 3 et 6 m (Randrup, 2000). Il a également été suggéré qu'une probabilité de pénétration par espèce devrait être prise en compte en cas de proximité avec les égouts (Östberg et al., 2012). L'âge du système d'égouts est un autre facteur principal, largement lié au type de matériau dont sont constitués les tuyaux et à l'abondance des joints de tuyaux (Stål, 1998). En Australie, les fissures d'étanchéité à base d'argile-ciment plus anciennes posent la plupart des problèmes, et les joints élastomères plus récents sont supérieurs, mais pas parfaits (Desilva et al., 2011). Dans une étude polonaise, la fréquence de l'intrusion des racines a chuté de 3,99 intrusions pour 100 m pour des tuyaux en argile vitrifiée à 0,59 intrusion pour 100 m pour des tuyaux en béton (Kuliczowska & Parka, 2017). Les égouts modernes en plastique, en fer ductile, en acier et en béton armé ont une résistance plus élevée à la compression et, lorsqu'ils sont associés à des joints en caoutchouc, limitent l'intrusion, car ils offrent plus de flexibilité après le tassement des tuyaux (Randrup et al., 2001). Enfin, des facteurs tels que la profondeur du tuyau, la taille du tuyau (Randrup, 2000 ; Randrup et al., 2001), l'identité de l'espèce (Kuliczowska & Parka, 2017 ; Östberg et al., 2012 ; Randrup, 2000 ; Randrup et al., 2001) et même le nombre de tiges d'arbre (Ossola et al., 2023) peuvent tous contribuer au problème. Des mesures d'atténuation et des suggestions sur la façon de réduire le nombre de conflits seront discutées dans la prochaine section.

2.3.2 Dommages mécaniques aux tuyaux et câbles

Bien qu'ils ne soient pas courants, les dommages mécaniques aux tuyaux et câbles peuvent résulter des interactions entre les racines et les conduits. Un article a examiné en détail ces interactions possibles (Mattheck & Bethge, 1999). Dans des circonstances normales, le poids et la répartition de l'ancrage des arbres sont uniformément répartis sous terre (Mattheck & Bethge, 1999; Fig. 4). Les tranchées ou les obstacles peuvent diminuer cette stabilité, et les objets (tuyaux et câbles) à proximité peuvent être utilisés comme points d'ancrage (Mattheck & Bethge, 1999). Ainsi, les frondes de racines, en particulier celles situées du côté soumis au vent de l'arbre et sous le tuyau, peuvent causer des ruptures de tuyaux lors d'événements venteux violents (Mattheck & Bethge, 1999 ; Watson et al., 2014). Au contraire, les tuyaux situés directement sous l'arbre sont soumis aux plus faibles quantités de stress (fig. 5). Une figure

récapitulative de Mattheck et Bethge (1999) peut être utilisée pour évaluer les risques de rupture de tuyaux dans diverses conditions ; ces risques dépendent évidemment de la résistance du tuyau (Fig. 6).

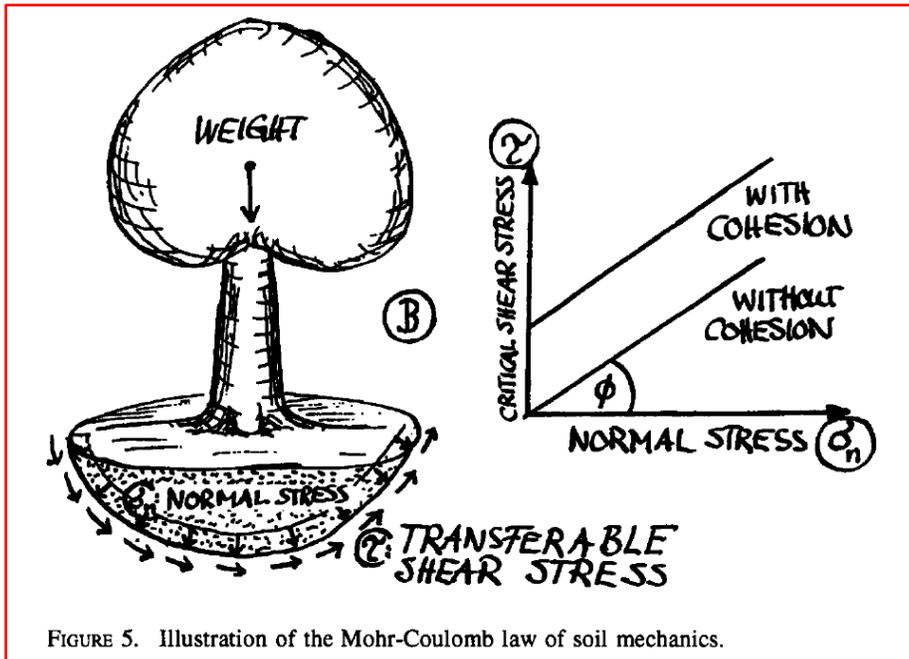


FIGURE 5. Illustration of the Mohr-Coulomb law of soil mechanics.

Figure 4 : Illustration d'une dispersion égale du stress sous conditions normales (Mattheck & Bethge, 1999; Fig. 5)

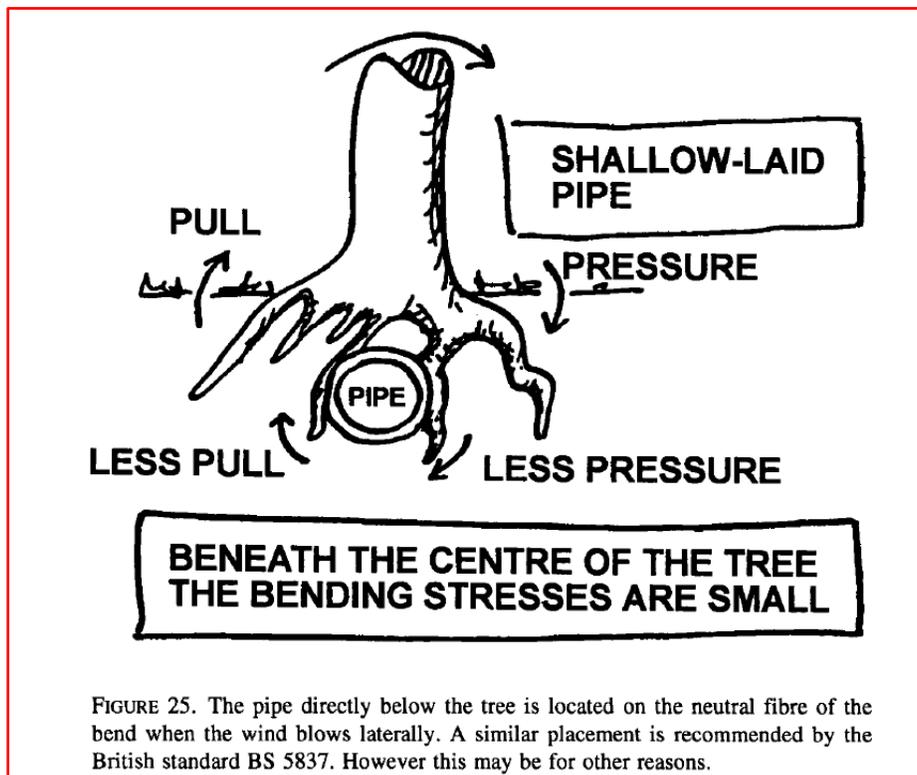


FIGURE 25. The pipe directly below the tree is located on the neutral fibre of the bend when the wind blows laterally. A similar placement is recommended by the British standard BS 5837. However this may be for other reasons.

Figure 5 : Moins de stress sur les tuyaux qui se trouvent directement sous l'arbre (Mattheck & Bethge, 1999; Fig. 25)

La direction du vent, l'estimation du rayon du tronc et la distance entre les arbres et les conduits sont tous des facteurs importants qui peuvent également contribuer à ces risques (Mattheck & Bethge, 1999). Lorsque des dommages surviennent, ceux-ci peuvent être classés dans l'une des cinq catégories (Mattheck & Bethge, 1999) :

- Compressions statiques : le tuyau (généralement en plastique) est comprimé par l'épaississement des racines lors de leur croissance, lorsqu'elles sont coincées entre un objet imperméable et le tuyau/le câble (Fig. 7a).
- Formation d'un oreiller : les arbres cherchent à répartir uniformément leurs charges de contrainte et réagissent aux obstacles (y compris les tuyaux) ; la sévérité est basée sur l'intensité et la durée du contact (Fig. 7b).
- Rupture par fatigue : une faiblesse préexistante est exploitée, progressant lentement et entraînant finalement une défaillance instable (Fig. 7c). Allongement progressif de la fissure jusqu'à atteindre une longueur critique (Fig. 7c).
- Formation d'une bretelle côté vent : introduction soudaine d'une charge dans un tuyau par une racine voisine due à la pression du vent.
- Formation d'un coussin de pression du côté abrité de l'arbre : causée par des forces de compression des racines situées au-dessus et pouvant entraîner des fissures sur la face inférieure si les racines sont plus épaisses que la bretelle (Fig. 7d).

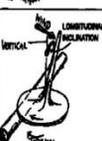
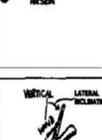
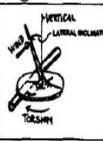
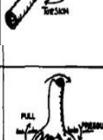
CONDITIONS		EVALUATION OF THE LOAD INTRODUCED
1	FORMATION OF A SLING ON THE LUV DUE TO INCLINATION AND WIND LOAD 	THE WIND LOAD AND THE WEIGHT PROMOTE THIS SLING FORMATION. THE INCLINATION OVERLAPS THE WIND INDUCED TENSION IN THE SLING
2	FORMATION OF A SLING ON THE LUV DUE TO WIND LOAD 	SUDDEN INTRODUCTION OF LOAD BY THE SLING
3	FORMATION OF THE SLING ON THE LUV DUE TO WIND AND TORSION RESULTING FROM THE INCLINATION IN THE DIRECTION OF THE PIPELINE 	SLING FORMATION AND SUDDEN TENSION MAY BE POSSIBLE, BUT OVERLAPPING TORSION MAY ALSO RESULT IN LOADS BEING INTRODUCED BY HORIZONTAL TRANSVERSE FORCES
4	SLING FORMATION DUE TO INCLINATION IN TRANSVERSE DIRECTION TO THE PIPELINE 	STATIC TENSION FORCES DUE TO INCLINATION AND HORIZONTAL TRANSVERSE FORCES DUE TO WIND-INDUCED TORSION
5	FORMATION OF PRESSURE CUSHION ON THE LEE UNDER LATERAL WIND 	STRONG PRESSURE INTRODUCTION, AS MUTUAL SHELTERING OF THE TREES IS LACKING
6	WIND IN PIPELINE DIRECTION, TREE ABOVE PIPE 	IF SHELTERED FROM THE WIND, MEDIUM LOAD INTRODUCTION, WINDWARD SLINGS AND LEE CUSHIONS POSSIBLE
7	WIND IN PIPELINE DIRECTION, SLANTED TREE IN TRANSVERSE DIRECTION NEAR THE PIPE 	FORMATION OF A PRESSURE CUSHION DUE TO THE INCLINATION, LESS WIND-INDUCED BENDING AND MORE TORSION THAN IN (6)
8	WIND IN TRANSVERSE DIRECTION TO THE PIPELINE, SLANTED TREE IN PIPELINE DIRECTION, BUT STANDING ON THE PIPE 	INCLINATION-INDUCED BENDING AND TORSIONAL LOAD
9	WIND IN TRANSVERSE DIRECTION TO THE PIPELINE, TREE ON THE PIPE 	HARDLY ANY BENDING LOAD, AS THE PIPELINE IS LOCATED ALONG THE NEUTRAL FIBER OF THE BEND (PROBLEM FOR TAP ROOTERS!)

Figure 6 : Illustration des évaluations de risque de rupture de tuyaux dans diverses conditions (Mattheck & Bethge, 1999).

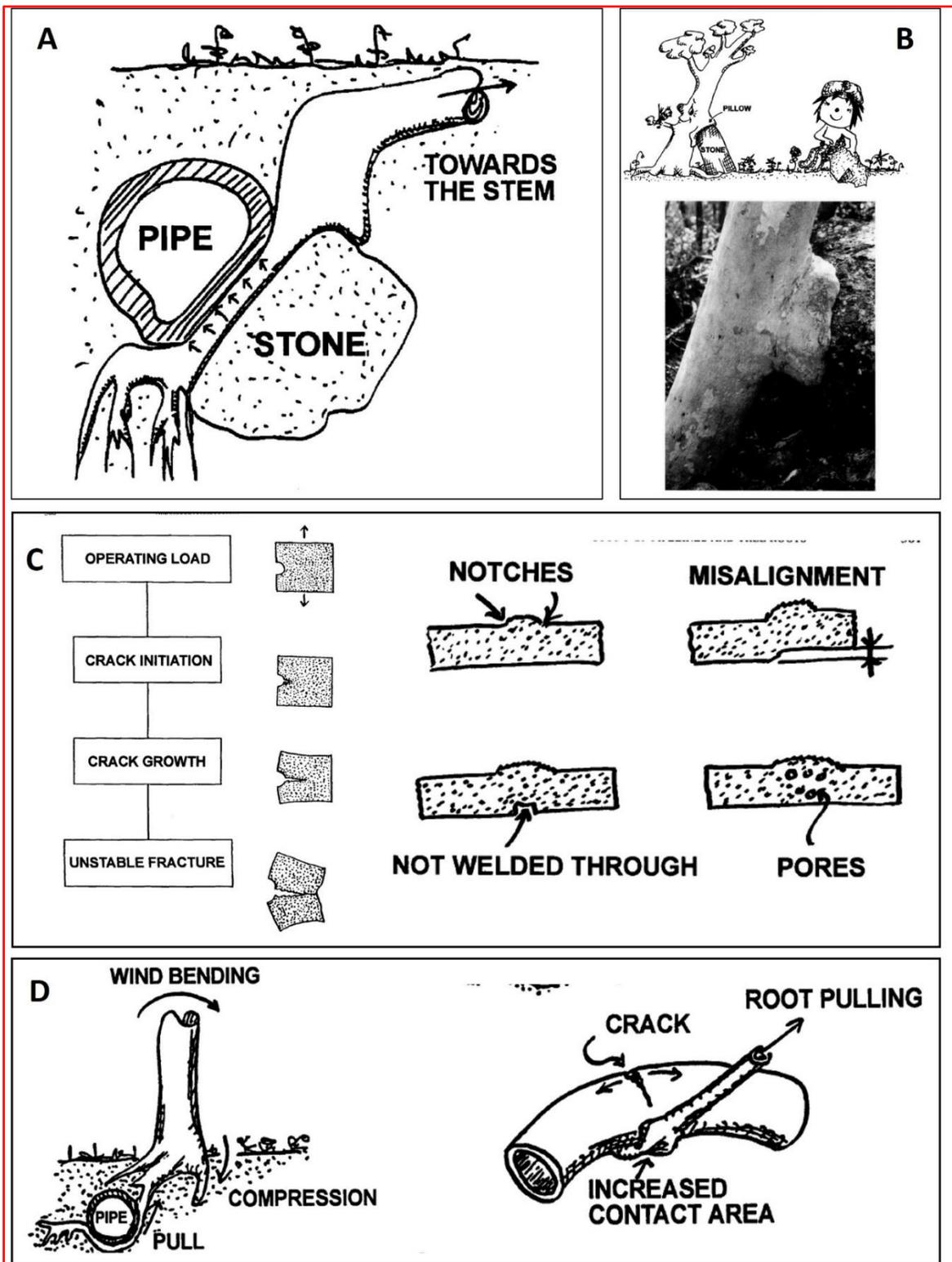


Figure 7 : Illustration des types de dommage : compression statique (A), formation d'un oreiller (B), rupture par fatigue (C), et formation d'un coussin de pression du côté abrité de l'arbre (D). Images prises de Mattheck & Bethge (1999).

2.3.3 Obstruction d'accès et intégrité de la sécurité des services

Outre les deux points mentionnés ci-dessus, la végétation et ses racines ne causent pas souvent de problèmes pour les réseaux souterrains. De plus, aucune preuve ne peut être fournie pour indiquer que les racines interrompent la fourniture de services (Chapman, 1982). En fait, différents représentants du secteur ont admis que d'autres services peuvent se nuire autant les uns aux autres que le font les arbres (Chapman, 1982). Ils ont également discuté de la manière dont les arbres peuvent causer des retards et des problèmes pour les différents secteurs. Pour les réseaux de télécommunications et d'électricité, l'accès est considéré comme le principal problème, les arbres étant plantés après coup et obstruant l'accès aux câbles. Aucun cas de pénétration de câble n'a été signalé, mais éviter ces racines lors des travaux peut être assez coûteux. Un impact non testé était la possibilité pour les racines d'affecter la capacité de transport des câbles en asséchant le sol environnant. Pour les conduits de gaz, les racines peuvent pénétrer le revêtement protecteur autour des tuyaux et permettre à l'eau d'entrer, réduisant ainsi la liaison entre le scellant et le tuyau. Les revêtements bitumineux ont été identifiés comme étant les plus vulnérables et le goudron de houille comme le plus résistant (Chapman, 1982).

La plupart des entreprises évitent ces conflits potentiels en imposant une distance de plantation minimale de 1,5 mètre (GazMétro, 2015 ; Hydro Ottawa, 2009 ; Hydro-Québec, 2022), mais la raison derrière le choix de cette distance n'est pas évidente. PG&E (compagnie Pacific Gas and Electric) a financé plusieurs projets liés aux effets des racines sur les conduites de gaz et a proposé trois zones de protection : zone de sécurité du tuyau (première 1.5m), zone de bordure du tuyau (1.5m à 3m) et zone extérieure (plus de 3m) (PG&E, 2022), mais ils reconnaissent eux-mêmes que cela pourrait ne pas être la mesure la plus efficace pour limiter les conflits (Nidd et al., 2014). Cela était basé sur une étude qui évaluait la coexistence des systèmes racinaires et des conduites de gaz (Nidd et al., 2014). Elle a constaté que 75 % des tuyaux examinés présentaient des dommages au revêtement externe, dont 38 % avaient ensuite des preuves de corrosion externe. De plus, il a été identifié que la profondeur, ainsi que la distance, étaient tous deux des déterminants importants des conflits potentiels (Nidd et al., 2014).

2.4_ L'impact du réseau public souterrain sur la végétation

Du point de vue de l'impact sur la végétation, le plus grand potentiel de dommages survient lors des travaux de construction, d'installation et de réparation, que ce soit par l'abattage d'arbres, la coupe de racines, l'enlèvement des racines ou les dommages mécaniques. Dans l'ensemble, ces interactions peuvent entraîner un dépérissement des arbres, une diminution de leur santé et une instabilité structurelle. En ce qui concerne la littérature, très peu de documents abordent directement les services publics - la plupart des sources traitent de concepts généralisés (fouille et construction) applicables au contexte des services publics souterrains et présentés ci-dessous. La coupe des racines représente l'impact négatif le plus important sur les arbres, entraînant une réduction de la croissance, un dépérissement, une instabilité, des changements physiologiques et une perte de valeur. Les effets des fuites de gaz et des facteurs humains seront également discutés.

2.4.1 Section des racines

La coupe des racines pourrait être considérée comme l'une des actions les plus impactantes et durables du conflit entre les arbres et les réseaux. Elle se produit principalement lors des fouilles nécessaires pour poser des canalisations et des câbles, ou pour effectuer des travaux sur les infrastructures existantes (Jim, 1998a). Dans ces cas, la nécessité de maîtriser les coûts pour les consommateurs et l'industrie incite à utiliser des stratégies « les plus rapides et les moins chères » pour rester compétitif, ce qui conduit à la coupe des racines rencontrées plutôt qu'à leur contournement (Chapman, 1982 ; Jim, 1998b). Les arbres peuvent récupérer de leurs blessures par coupe de racines si la chance leur était donnée de se rétablir, mais la réalité de l'environnement urbain ne permet pas toujours cela (Watson et al., 2014). Cependant, des mesures peuvent être prises pour limiter l'impact de la coupe des racines et favoriser la régénération des racines (voir la section 3.1 pour plus de détails).

La plupart des recherches actuelles sur le sujet se concentrent sur la croissance et le dépérissement immédiatement après les dommages - et moins sur les réponses physiologiques et la stabilité à long terme des arbres (Fini et al., 2020). Dans de nombreux cas, les arboristes peuvent ne pas être conscients de l'instabilité causée par les dommages souterrains sur les arbres à la suite de la coupe des racines jusqu'à ce que l'arbre tombe (Chapman, 1982). Malgré le manque de littérature sur la stabilité des arbres après la coupe des racines, des preuves suggèrent que la susceptibilité à l'arrachement est plus répandue chez certaines espèces (Watson et al., 2014). De plus, l'ancrage des arbres a été compromis principalement par des tranchées creusées le long des arbres, en particulier lorsqu'elles sont plus proches que 2,5 fois le diamètre du tronc du côté de la tension de l'arbre (Watson et al., 2014). Cet effet a été amplifié avec l'utilisation de tranchées supplémentaires car les arbres avec une croissance asymétrique ou des systèmes racinaires restreints sont moins stables (Watson et al., 2014). La pénétration des racines peut générer une force surprenante, et donc tout dommage de fouille peut causer une instabilité structurelle majeure (Mattheck & Bethge, 1999).

En ce qui concerne le dépérissement et la croissance, il existe des informations contradictoires au sein de la maigre littérature scientifique sur le sujet (Watson et al., 2014). Une étude a signalé une croissance réduite des arbres lorsque des tranchées ont été excavées à 0,5 m de la base de

l'arbre, mais aucune réduction de croissance constante n'a été mesurée si les tranchées étaient placées à trois fois le diamètre du tronc ou plus (Miller & Neely, 1993). Une autre étude a enregistré des données de croissance annuelle et de mortalité de quatre espèces pendant quatre ans après l'installation de lignes téléphoniques dans des tranchées à proximité des arbres (Miller & Neely, 1994). Tout au long de l'essai, seuls 7 arbres sur 98 sont morts, et il a été constaté que la distance globale de tranchée ne prédisposait pas les arbres aux maladies ou aux infestations d'insectes. De plus, seule la croissance de *Celtis occidentalis* a été impactée par les tranchées (Miller & Neely, 1994). D'autres études ont enregistré un dépérissement modéré lorsque plusieurs tranchées ont été creusées à proximité des arbres (Watson, 1998). Enfin, Hauer et al. (1994) ont observé une augmentation de 4 % de la mortalité couplée à une baisse de 5 % de l'indice de condition des arbres de rue à la suite de travaux de construction le long des rues et des trottoirs (Hauer et al., 1994).

Les réponses physiologiques peuvent également survenir en raison de la coupure des racines, impactant la capacité d'un arbre à acquérir des nutriments, de l'oxygène et de l'eau (Fini et al., 2013, 2020). Deux études ont évalué les effets des techniques de tranchée simple et double respectivement à 26 (Fini et al., 2013) et 51 mois (Fini et al., 2020) après la coupure des racines. Les résultats ont indiqué que la réduction de la croissance, normalement observée après des dommages causés par la construction, est due à la réduction de l'échange gazeux foliaire et des capacités de rétention d'eau (Fini et al., 2013). Les arbres ont présenté des réponses similaires à celles lors d'un stress hydrique léger, même malgré les précipitations supérieures à la moyenne survenues pendant la période d'étude (Fini et al., 2013). Des signes de photoinhibition ont également été détectés (Fini et al., 2013). La résistance à l'arrachage avait également diminué de 20 à 66 % après les interventions, rendant les arbres prédisposés à l'arrachage lors d'événements météorologiques violents (Fini et al., 2020). Quatre ans après la coupure initiale des racines, les arbres n'avaient toujours pas complètement récupéré, mais la réduction de la croissance et le dépérissement étaient minimes malgré un retrait de 70 % des racines (Fini et al., 2020). Cependant, les schémas de récupération du stress observés étaient durables, et les auteurs ont donc émis l'hypothèse que la coupure en soi ne cause pas le dépérissement, mais rend plutôt l'arbre plus susceptible à d'autres stress (Fini et al., 2013, 2020). La diminution de la disponibilité en carbone (photosynthèse et échanges gazeux réduits) diminue la capacité des arbres à résister à des stress co-occurents (Fini et al., 2020). Par conséquent, à court et moyen terme, si aucun autre stress ne survient (sécheresse, défoliation, ravageurs, maladies, etc.), les arbres peuvent survivre à une perte de racines sévère, mais des données à long terme supplémentaires sont nécessaires pour confirmer cela (Fini et al., 2020). Limiter les stress supplémentaires à la suite d'une coupure des racines, intentionnelle ou accidentelle, pourrait donc être une manière d'atténuer la perte globale des avantages des arbres.

Enfin, la perte de racines peut affecter la valeur d'un arbre, car les évaluations économiques sont généralement basées sur la vitalité, la taille et la durée de vie d'un arbre (Benson & Morgenroth, 2019), tout comme les évaluations des services écosystémiques. En règle générale, plus la proportion de perte/de retrait de racines dans la zone de protection de l'arbre est grande, plus la perte de valeur est importante (Benson & Morgenroth, 2019). Bien qu'ici encore, l'établissement de zones de protection des arbres efficaces puisse poser un problème (voir Section 2.1). Par conséquent, bien que la recommandation générale soit toujours d'éviter toute rencontre avec des racines, en les contournant ou en utilisant des techniques moins invasives,

la coupure peut être inévitable dans certains cas - surtout dans les cas où les racines ont poussé autour de câbles et de tuyaux existants (Chapman, 1982). Certaines façons de limiter l'impact de ces cas seront discutées dans la section 3.

2.4.2_ Les réseaux de gaz naturel

Analysons le conflit d'un point de vue spécifique au secteur, les conduites de gaz représentent la menace suivante la plus importante pour la santé des arbres. Les fuites de gaz ont été identifiées comme la principale cause de dommages aux arbres par un panel d'experts (Chapman, 1982). Il convient de noter que la technologie et les normes d'installation ont probablement évolué depuis cette conférence du début des années 80. Cependant, le gaz naturel peut toujours endommager les racines en créant des sols appauvris en oxygène, entraînant ainsi une suffocation ultérieure. Les effets des fuites de gaz naturel sur les arbres ressemblent à ceux de l'engorgement et de la sécheresse et, bien qu'ils soient dommageables, ils ne conduisent pas souvent à la mort des arbres. Les fuites en hiver peuvent entraîner un débourrement retardé des feuilles, tandis que celles en été peuvent entraîner un brunissement précoce des feuilles. Dans tous les cas, une dégradation des rameaux et des branches peut être observée (Chapman, 1982).

Une étude récente menée au Massachusetts a mesuré les concentrations de méthane et d'oxygène dans le sol des arbres sains par rapport à ceux qui étaient morts ou en train de mourir (Schollaert et al., 2020). Les arbres à proximité des conduites de gaz étaient 30 fois plus susceptibles d'être exposés au méthane dans le sol, avec les concentrations les plus élevées trouvées dans les fosses à arbres les plus proches de la route, là où les conduites sont enterrées. De plus, des arbres moins sains ont été observés dans ces zones. Environ 25 % des arbres traités ont été exposés au méthane, contre seulement 1 % des arbres témoins. Les arbres exposés présentaient également des niveaux d'oxygène dans le sol plus bas. Par conséquent, les fuites de méthane ont le potentiel de causer des dommages aux arbres des rues (Schollaert et al., 2020).

2.4.3_ Les autres réseaux

Lors d'une Conférence nationale d'arboriculture à York, un panel d'arboriculteurs et de représentants de différentes entreprises de services publics s'est réuni pour discuter de l'impact du réseau sur les arbres (Chapman, 1982). Pour les services de télécommunication et d'eau, les principaux impacts indiqués étaient le creusement de tranchées lors de l'installation et la rencontre de racines inattendues lors des travaux de maintenance, entraînant tous deux une section des racines. De plus, la coupe des racines causant des obstructions dans les égouts a également été identifiée comme un impact, mais largement inévitable sans d'autres mesures d'atténuation. À l'exception du gaz et de la construction (voir sections 2.4.1 et 2.4.2), les impacts sur les arbres étaient considérés comme minimes, mais il a été noté qu'une meilleure coopération lors de la plantation d'arbres aiderait à accroître davantage l'harmonie entre les arbres et les services publics (Chapman, 1982).

2.4.4_ Le facteur humain

Certains conflits proviennent d'erreurs humaines, principalement issues d'un manque de formation et/ou d'une mauvaise planification. Pour limiter les dommages pendant la construction, les facteurs humains, les limitations technologiques et les politiques actuelles ont été évalués dans une étude de 2020. Étonnamment, les facteurs humains ont été identifiés comme les plus importants pour influencer le processus de prévention des dommages, la communication entre les parties prenantes, la formation accrue, le développement des politiques et de la sensibilisation, ainsi que le comportement humain étant répertoriés comme des facteurs cruciaux pour limiter les dommages lors des constructions (Al-Bayati & Panzer, 2020). Par exemple, au Royaume-Uni, l'ajout majeur de câbles de télécommunication a entraîné des dommages à hauteur de 30 % sur les arbres de rue (Hetherington, 1994). La planification de l'entreprise a ignoré les arbres, les considérant comme des obstacles à leurs conceptions en ligne droite, et a priorisé la nécessité de réduire les conflits avec la circulation et les entreprises. Cette décision a conduit à des dommages ou à l'abattage de près de 300 arbres par mois et a nécessité une intervention résidentielle, municipale et gouvernementale pour limiter les dommages futurs (Hetherington, 1994). De plus, selon une enquête menée auprès de professionnels polonais travaillant sur des chantiers de construction, des politiques et des directives visant à protéger les arbres ne sont pas toujours respectées (Suchocka et al., 2019). Les deux tiers des travailleurs estimaient que les arbres étaient protégés sur les chantiers moins de 60 % du temps, et la moitié a admis que dans les cas où les politiques de protection des arbres étaient appliquées, plus de 60 % ne l'étaient pas de manière adéquate. Le manque de formation, de mise en application et de budget a été identifié comme des facteurs principaux (Suchocka et al., 2019). Par conséquent, l'erreur humaine a un impact indirect sur la végétation en augmentant le nombre et l'ampleur des interactions négatives. Certaines suggestions pour améliorer cette situation seront élaborées plus en détail dans la section des solutions et recommandations.

2.5_ Coût du conflit

Les coûts peuvent être un puissant moteur ou un facteur limitant lorsqu'il s'agit de réduire le nombre de conflits entre les arbres et les services publics. Aujourd'hui, en raison des coûts, les services publics prennent souvent le pas en cas de conflit (Jim, 1998a, 1998b ; Slater & Chalmers, 2022), parfois au détriment de la santé des arbres (Slater & Chalmers, 2022 ; Thomson & Rumsey, 1997), allant même jusqu'à l'abattage complet des arbres (Jim, 1998a). Les arbres ne peuvent être considérés comme intérêt particulier que dans certaines circonstances et bénéficier d'une priorité accrue (Slater & Chalmers, 2022). Une explication à la moindre priorité accordée aux arbres est le manque de reconnaissance des coûts que les arbres aident à réduire (Garrick, 2018). Une intervention sous le pavé aux États-Unis - où de nombreux services publics sont enfouis - peut coûter aussi cher que 100 \$ par pied carré, sans tenir compte des arbres (Jung & Sinha, 2007). En revanche, les arbres peuvent fournir jusqu'à 40 000 \$ de services, selon une étude menée dans trois villes américaines, avec des projections à la hausse au fil du temps (Widney et al., 2016). Cependant, ces évaluations ne sont pas toujours "tangibles", rendant les comparaisons directes entre l'infrastructure et la valeur des arbres plus difficiles.

Lorsqu'on examine les coûts du point de vue des arbres, il existe très peu de distinction entre les coûts totaux/budgets et les causes des différentes interventions. Une analyse approfondie de la gestion et de l'entretien des arbres aux États-Unis a été menée en 2015 par Hauer et Peterson, où les programmes de gestion des arbres urbains ont été évalués dans 1735 communautés et comparés à différents moments en 1974, 1980, 1986 et 1993 (totaux ajustés pour l'inflation). Le budget moyen pour les soins aux arbres dans les villes en 2014 était de plus de 801 000 \$, représentant 52 % du budget municipal moyen total. Au cours des 40 dernières années, la proportion relative du budget de soins aux arbres a été assez variable, représentant respectivement 54 % (1974), 81 % (1980), 49 % (1986) et 31 % (1993) par année. Cependant, l'investissement par habitant a augmenté à 8,76 \$/habitant (contre 7,82, 6,29, 5,62 et 4,08 au fil des années). Ces budgets englobent toutes les activités de soins aux arbres, les plus importantes étant la taille des arbres (24,5 %), l'abattage des arbres (23,3 %) et la plantation d'arbres (14,2 %), principalement sur les arbres de rue (62 %) (Hauer & Peterson, 2015). Les conflits avec les services publics joueraient probablement un rôle dans les domaines des dépenses les plus importantes actuellement observées.

En effet, l'idée du coût sera toujours un facteur limitant en matière de verdissement. Québec Vert a publié un guide sur la mise en œuvre d'infrastructures végétales dans les environnements urbains et a souligné que la question du coût est un aspect important à considérer, et que les projets devraient prendre en compte non seulement les coûts de réalisation, mais aussi les coûts de maintenance (Frédette, 2023). Cependant, quatre étapes ont été identifiées pour surmonter les obstacles existants :

- 1) La nécessité d'études et d'analyses sur les coûts/bénéfices de différentes stratégies et comparaisons entre elles ;
- 2) La diffusion plus large des études existantes ;
- 3) Le développement de nouveaux programmes de financement à tous les niveaux gouvernementaux ; et

- 4) L'adaptation des critères d'admissibilité aux programmes de financement existants (Frédette, 2023).

Ces concepts de verdissement pourraient facilement être intégrés dans un cadre tenant également compte des services publics souterrains.

Du point de vue des services publics, seules des informations relatives aux réseaux d'égouts ont été trouvées. McPherson et Peper (1995) ont examiné le coût annuel des réparations d'égouts dans 15 villes des États-Unis et du Canada en utilisant des enquêtes municipales. Ils ont constaté que le coût annuel total du béton (routes, trottoirs, bordures et caniveaux) et des réparations d'égouts liées aux dommages causés par les arbres s'élevait en moyenne à 4,28 \$ par arbre, avec une fourchette allant de 0,18 \$ à 13,65 \$ par arbre; et où les bordures représentaient la plus grande dépense. Les coûts de réparation des égouts s'élevaient en moyenne à environ 1,66 \$ par arbre, avec une grande variabilité entre les villes (allant de 0,11 \$ à 6,39 \$). Ces coûts combinés correspondaient à environ 25 % des dépenses annuelles du programme d'arbres, en moyenne (allant de 13 à 30 %), et étaient notés comme étant les plus graves dans les anciens quartiers des villes où se trouve une combinaison d'infrastructures anciennes et d'arbres plus grands.

En Europe, Randrup (2000) a évalué les coûts de l'enlèvement des racines et du remplacement des canalisations pour les villes danoises en envoyant une enquête ciblée à ceux travaillant directement sur la maintenance des égouts. Le coût annuel moyen de l'enlèvement des racines était estimé à 6 530 \$ par ville et par an, allant de 0 \$ à 65 000 \$. Les coûts totaux de l'enlèvement des racines dépassaient 9 millions de dollars, et il a été constaté que les « moyennes » villes (populations de 16 000 à 50 000 habitants) avaient les coûts par habitant les plus élevés à 2,19 \$, suivies des petites villes (1,69 \$) et des grandes villes (1,31 \$). Comparativement, les coûts de réparation ou de remplacement des canalisations dues aux racines s'élevaient en moyenne à 38 824 \$ par ville et par an, allant de 0 \$ à 266 666 \$. Les coûts totaux pour le remplacement et l'enlèvement constituaient 7 % des dépenses annuelles totales pour la gestion des réseaux d'égouts danois (Randrup, 2000). Une enquête similaire a été menée en Suède et a révélé que 99 % du réseau d'égouts suédois était affecté par les racines des arbres, entraînant un coût estimé des dommages de 4,5 millions de livres sterling (Stål, 1998). Par conséquent, le coût total des arbres ne serait peut-être pas aussi important qu'on le pensait à l'origine, et le coût des travaux préventifs ou d'entretien (atténuation et enlèvement des racines) pourrait s'avérer plus rentable que les remplacements. Cependant, la tendance générale actuelle est à l'adoption de stratégies plus réactives plutôt que proactives en raison des contraintes budgétaires (Desilva et al., 2011), ce qui ne permet pas d'anticiper le problème.

Il existe également une tendance dans la littérature à faire allusion au « conflit coûteux » ou au « problème coûteux » sans entrer dans les détails des coûts (Chapman, 1982 ; Garrick, 2018 ; Jung & Sinha, 2007 ; Morgenroth, 2008 ; Pohls et al., 2004 ; Ridgers et al., 2006). Que ce soit en ce qui concerne l'utilisation de technologies alternatives visant à protéger les arbres (Jung & Sinha, 2007 ; Morgenroth, 2008 ; Ridgers et al., 2006), le rôle des coûts dans la décision de conserver ou d'abattre des arbres (Jim, 1998b ; Slater & Chalmers, 2022), ou même les coûts associés à la recherche dans ce domaine (Shi et al., 2023), la quantification de ces « coûts » est rarement réalisée. Cela rend difficile d'obtenir une estimation précise de « l'ampleur des dommages » résultant de ce conflit. De plus, des études de coûts plus complètes ne se

concentrent généralement pas sur les services publics souterrains, mais portent plutôt sur l'environnement urbain plus large - comme le tableau récapitulatif inclus dans Shi et al. (2023; Tableau 1). À partir de ces études, il peut être plus difficile de déterminer les spécificités liées aux interventions des services publics souterrains et aux abattages/d'entretien des arbres, mais elles peuvent néanmoins fournir des informations générales pour estimer l'ampleur globale du problème.

Tableau 1 : Perte économique en raison des dommages racinaires (Shi et al. 2023; Tableau 1)

Country/region	Statistical year	Cost estimates	Specific information	References
Hayward, USA	1972	(1)85000(\$)/per staff (2)75000(\$)/per staff	Expenditure on materials for sidewalks, curbs, and drains, as well as maintenance equipment and staff labor. Cost for root cutting and stump removal. If sewer maintenance or replacement is involved, an additional \$400 will be added for each location.	(Hamilton, 1984)
Northern California, USA (22 municipalities)	1975	Average 27,000(\$) per year	Cost to repair damaged sidewalks.	(Hamilton et al., 1975)
California, USA	2000	70million(\$) 1.64billion(¥)	The repair cost of sidewalks in Los Angeles is 23 million(\$); The government's compensation for pedestrian injuries caused by sidewalk damage is as high as 6245(\$) per case, totaling 9 million(\$) in California. The cost is the total expenditure of tree maintenance in the city.	(Zhang and Huang, 2009)
Beijing, China	2019	581.7million(¥)	The cost is spent on infrastructure damage and maintenance. Including but not limited to damage repair and routine maintenance of sidewalks, street sidewalks, curbs, drains, sewers, and other infrastructure.	(Wu et al., 2021)
Germany	2009	28.40million(€)per year	The cost is used for the maintenance and replacement of underground pipelines, mainly for the following waterways and drainage ditches.	(Bennerscheidt et al., 2009)
Sweden	2003	5.6millio(€)	The cost is used for the maintenance and replacement of underground pipelines, mainly for electric wires, sewers, and drainage ditches.	(Orvesten et al., 2003)
Canada	2002	1.5-2.4billion(C\$)	In Canada, 15-20 % of every 100,000 km of sidewalks need to be replaced, but these damages are not all caused by the root damage of roadside trees.	(Rajani, 2002a)
Auckland, New Zealand	2017	19million(NZ\$)	The cost is used for the repair and maintenance of roads and open spaces in Auckland, as well as related expenses such as tree cultivation.	(White et al., 2017)

Le coût peut constituer un facteur limitant quant à la volonté des entreprises d'adopter des stratégies préventives ou d'adopter des techniques pouvant aider à réduire les conflits futurs. Par exemple, la recommandation d'inspecter régulièrement les tuyaux d'égout pour détecter l'intrusion des racines afin d'éviter les interventions à grande échelle et d'atténuer les obstructions à un coût associé. Cela s'applique même à l'utilisation de techniques « non pilotées » telles que la vidéosurveillance (CCTV) (Desilva et al., 2011 ; Randrup, 2000). En revanche, le coût de la réparation et du débouchage peut également être substantiel (Randrup et al., 2001). Cependant, sans données réelles sur les coûts, comment pouvons-nous évaluer ce qui est le plus coûteux à long terme ? Des analyses plus rentables seraient extrêmement utiles pour obtenir de meilleurs résultats à moindre coût global (Marlow et al., 2011). Sinon, cet argument de « trop coûteux » sans aucune information de soutien ou de comparatif pourrait limiter la mise en œuvre de solutions par ailleurs prometteuses. Une étude a soutenu que l'installation de câbles de distribution électrique souterrains et de fibres optiques dans les servitudes existantes sur les égouts ou autres structures souterraines pourrait accélérer et rendre moins coûteuse la transition vers le souterrain - mais les entreprises ont résisté à l'idée de conduits partagés en affirmant qu'ils seraient « trop coûteux » (Jey & Jeyapalan, 2005). La résistance aux nouvelles idées persistera sans la preuve que ces solutions peuvent être rentables à l'avenir, d'où le grand besoin de plus de recherches et d'informations sur le sujet, surtout dans un contexte nord-américain et pour les services publics souterrains autres que les égouts.

CHAPITRE 3 — SOLUTIONS ET RECOMMANDATIONS PROPOSÉES

Fort d'une compréhension des causes et des impacts du conflit entre les arbres et les services publics souterrains, nous pouvons commencer à développer des solutions et des recommandations pour y remédier. Il est important de noter qu'à l'exception des études sur les réseaux d'égouts, aucune étude expérimentale n'a été trouvée concernant les solutions et recommandations visant à limiter les conflits entre les arbres et les services publics souterrains. Une grande partie des informations présentées est de nature théorique, basée sur des observations dans la littérature, mais non testée dans des scénarios réels. Par conséquent, il n'est pas possible d'évaluer l'efficacité ou la faisabilité des concepts, des recommandations et des solutions ci-dessous pour réduire le conflit. Plus d'informations et d'études sont nécessaires pour faire de telles déclarations, et les informations suivantes doivent être évaluées avec un regard critique. De plus, il est proposé qu'une compréhension approfondie de la physiologie de base et croissance des arbres en milieu urbain est nécessaire afin de mieux comprendre et limiter le conflit (Comery 2000).

La section suivante sera divisée en quatre axes majeurs : 3.1) limiter l'impact de la section des racines, 3.2) limiter les conflits avec le réseau de services publics, 3.3) recommandations pratiques pour les systèmes d'égouts et 3.4) recommandations pratiques pour le réseau de gaz naturel. Lorsque cela est possible, des recommandations spécifiques à chaque secteur seront formulées pour les deux premiers points, mais le manque d'informations ciblées ne rendra pas toujours cela possible. Avant d'entrer dans les détails, une recommandation était prédominante indépendamment du secteur ou de la perspective des arbres ou des services publics souterrains : **la nécessité d'une planification plus avancée, d'une collaboration intersectorielle, et de l'éducation et la formation.**

La planification était la solution la plus mentionnée dans les études examinées, mais aucun plan spécifique ou de solution pratique n'ont été fournis. De nombreux auteurs ont souligné que de nombreux conflits pourraient être évités en planifiant non seulement pour la plantation immédiate, mais aussi pour la croissance à long terme des arbres à proximité des services publics (Strom, 2000 ; Mullaney et al., 2015; Parriaux et al., 2007). Les arbres doivent également être activement pris en compte dans le processus de planification et non simplement une réflexion après coup pour « s'arranger avec » une fois que les plans ont déjà été établis (Garrick, 2018; Jim, 2001, 2013; Obradović, 2017). D'autre part, la plantation devrait prendre en considération les réseaux déjà en place. Cela limiterait non seulement les conflits, mais permettrait également à l'arbre de fournir davantage de bienfaits (Garrick, 2018; Jim, 2013).

Pour y parvenir, les professionnels de tous les secteurs devraient être impliqués à toutes les phases d'un projet, de la planification et de la conception à la construction et à l'installation (Frédette, 2023; Garrick, 2018). Une collaboration précoce et continue est essentielle si nous espérons concevoir des solutions bénéfiques à la fois pour les arbres et les services publics souterrains, et pour limiter les dommages globaux (Chapman, 1982; Garrick, 2018). Cette collaboration intersectorielle maximise également la responsabilité et la propriété du produit

final parmi tous les acteurs (Drangsholt et al., 2013). De plus, une communication accrue entre les parties limitera le nombre d'interventions répétées de sorte que les tranchées ne soient pas construites sur plusieurs côtés ou à plusieurs moments dans un court laps de temps (Jim, 2001). En effet, pour favoriser la stabilité de l'arbre et encourager la régénération des racines, une seule tranchée, située du côté sous le vent de l'arbre (où il y a moins de masse racinaire (Nicoll & Ray, 1996)), devrait être adoptée dès que cela est possible (Watson et al., 2014). Une communication et une coordination accrues permettraient à plusieurs secteurs de planifier leurs interventions simultanément, surtout dans de nouveaux développements. Cela limiterait également les dommages involontaires causés par d'autres services publics (Chapman, 1982).

L'idée de planifier plusieurs interventions de réseaux publics et des stratégies de plantation d'arbres en même temps peut être une tâche intimidante, surtout lorsqu'elle n'est pas courante. D'innombrables guides de planification municipale des réseaux publics ont été consultés au cours de cette étude et peu, voire aucun, ne considéraient plusieurs réseaux publics en même temps, ou en tenait compte des arbres nouveaux et existants (City of Brantford, 2022, 2023b; City of Vancouver, 2016). Cette « pensée unique » augmentera inévitablement les futurs conflits qui auraient pu être évités autrement, mais cela nécessite également un changement fondamental dans l'infrastructure (autant verte que grise) et le fonctionnement des choses actuellement réalisées - ce qui n'est pas toujours facile. Un plan de verdissement a mentionné la notion de « rues complètes », où tous les aspects (infrastructures au-dessus et en dessous du sol ainsi que les arbres) devraient être considérés simultanément, mais aucune recommandation appliquée n'a été donnée (City of Phoenix, 2010). Une planification avancée et une collaboration intersectorielle accrue contribueront à réduire cette lacune de connaissances.

Enfin, la nécessité d'une éducation et d'une formation pour les travailleurs sur les chantiers de construction a été identifiée comme un facteur clé pour améliorer la santé et la protection des arbres lors de l'installation et de la réparation des réseaux publics souterrains. Cela, ainsi qu'un traitement rapide des arbres endommagés, une sélection adéquate des espèces et des efforts de verdissement coordonnés atténueraient considérablement l'impact des services publics sur les forêts urbaines (Jim, 2001, 2013). Une étude visant à réduire les dommages aux réseaux publics souterrains a révélé que les comportements des parties prenantes étaient les plus importants, à savoir le manque de formation et le manque de connaissance de l'emplacement des autres réseaux publics (Al-Bayati & Panzer, 2020). Un exemple réussi a été observé au Royaume-Uni lors de l'installation de câbles de télécommunication (Hetherington, 1994). Suite à des préoccupations initiales exprimées par les citoyens concernant la perte et les dommages aux arbres pendant les premiers travaux, les gouvernements municipal et fédéral ont investi dans la formation des travailleurs et la création d'un guide des meilleures pratiques (Fig. 8). Les aspects les plus difficiles de l'opération ont été rencontrés lors de la tentative de convaincre la société de services publics et l'entrepreneur que la formation était nécessaire et bénéfique. Globalement, l'impact sur les arbres a été considérablement réduit depuis la campagne de formation et d'éducation, mais avec autant de groupes impliqués, la supervision était difficile, et des erreurs ont encore été commises (Hetherington, 1994). Cependant, cette étude de cas illustre l'importance de s'assurer que toutes les parties prenantes comprennent pourquoi le coût supplémentaire peut valoir l'effort pour protéger les arbres.

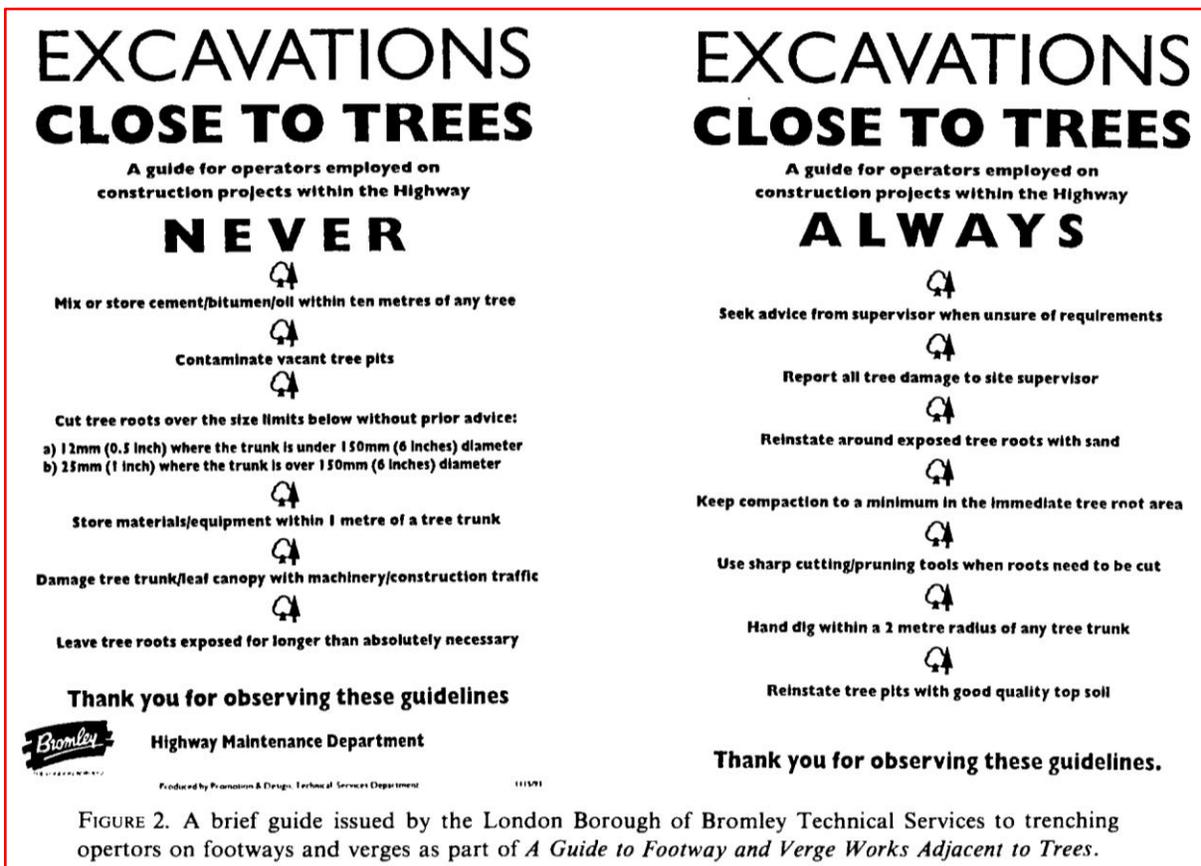


Fig. 8 : Guide de meilleures pratiques développées au Royaume-Uni en réponse à une intervention sur des câbles de télécommunications (Hetherington 1994, Fig. 2).

3.1 Limiter l'impact de la section des racines

La section des racines représente le principal problème pour la santé et la longévité des arbres lors de l'examen du conflit entre les arbres et le réseau souterrain. Plusieurs stratégies peuvent être adoptées pour atténuer le risque de conflit. Éviter les zones où se trouvent la plupart des racines est l'une de ces stratégies. En règle générale, la masse racinaire structurelle est située du côté sous le vent des arbres et dans les premiers 0,5 mètre à partir du tronc (Nicoll & Ray, 1996). Ainsi, pour éviter la plus grande masse racinaire, le creusement devrait être limité du côté sous le vent et à une distance minimale pour assurer la stabilité de l'arbre (plus de détails ci-dessous). Cependant, une autre étude a constaté que les élingues de racines sont plus courantes du côté sous le vent des arbres (Mattheck & Bethge, 1999), donc même ici, la solution n'est pas évidente. De cette manière, la distance pourrait être un facteur plus important à considérer que l'emplacement. De plus, l'utilisation accrue des technologies sans tranchée contribuerait également à atténuer le problème.

3.1.1 Distances minimales de sécurité – Zone de protection des arbres

Lors de la consultation de la littérature, la mise en place de Zones de Protection Optimale de l'arbre (ZPO) ou de distances minimales de sécurité était la principale recommandation pour limiter ou éviter complètement les conflits et les dommages aux arbres. Cela concernait

principalement des travaux de construction générale ou l'utilisation de tranchées, sans nécessairement être directement lié aux réseaux publics. Il était donc surprenant de constater que les ZPO recommandées étaient très variables et que les informations sur lesquelles elles étaient basées étaient difficiles à retracer. De plus, il semble y avoir très peu de recherches sur la « distance minimale de sécurité » que devraient avoir les tranchées, et tous les documents existants citent la même source. Une étude menée par Miller (1993) a examiné les effets des tranchées sur la croissance et la santé globale de quatre espèces dans l'Illinois (*Celtis occidentalis*, *Liquidambar styraciflua*, *Acer saccharum*, *Gleditsia triacanthos*). Les effets des tranchées ont été évalués à des distances variables allant de 0,5 m à 3,3 m de la base des troncs et les résultats ont montré que la distance ne semblait pas affecter la prédisposition aux maladies ou aux ravageurs. Sur les quatre espèces, seule *Celtis occidentalis* a montré une diminution marquée de la croissance (réduction de 45 %) à la distance de tranchée la plus proche (0,5 m) sur 5 ans (Miller, 1993).

La recommandation la plus largement utilisée indique qu'une **distance minimale de 0,15 m est nécessaire pour chaque 2,5 cm de diamètre de tronc** (Miller, 1993 ; Miller & Neely, 1994). Celle-ci semble être basée sur une étude citée dans Watson et al. (2014) où des tranchées ont été creusées le long des arbres et où l'ancrage a été compromis uniquement à des distances inférieures à 2,5 fois le diamètre du tronc du côté en tension - aucune mention des effets sur la croissance ou la santé n'a été faite. La plupart des citations remontent à une brochure d'information sur la prévention des dommages causés par la construction aux arbres (Watson, 1990).

Les règles typiques pour estimer la propagation des racines (3 fois la propagation de la canopée ou 1-1,5 fois la hauteur de l'arbre) peuvent également régir les recommandations de ZPO, conduisant à une autre recommandation de **0,18 m de distance par cm de diamètre de tronc**, censée englober la majorité des racines (Day et al., 2010a ; Jim, 2013). Cependant, la précision de ces recommandations peut dépendre de l'espèce ou de la variété, de la vigueur de l'arbre et de l'environnement racinaire (Day et al., 2010a). Si la protection de la masse racinaire - et donc la santé et la stabilité de l'arbre - est l'objectif, une revue a été menée sur les trois principales méthodes d'estimation, dont les auteurs ont mis en garde contre l'interprétation et l'utilisation en raison du manque d'études (Day et al., 2010a ; Fig. 9 et Tableau 2).

Tableau 2 : Trois méthodes d'estimation de la masse racinaire

Type	Commentaires
Taille de l'arbre comme prédicteur	<ul style="list-style-type: none"> • Les arbres en croissance ouverte présentent une dispersion racinaire plus large que les arbres en forêt de la même espèce en fonction de la hauteur de l'arbre. • La variation de la dispersion des racines en fonction de la hauteur de l'arbre n'explique que 36 % de la variabilité totale, limitée par le manque de données publiées. • Même au sein de la même espèce et de la même région, la variation de la dispersion des racines ne peut expliquer que 33 à 50 % des différences.

Type	Commentaires
Diamètre de la canopée comme prédicteur	<ul style="list-style-type: none"> Le diamètre du système racinaire varie considérablement par rapport à la taille de la canopée, dépend fortement de l'espèce d'arbre. Une étude sur les arbres de pépinière a montré que les diamètres du système racinaire étaient en moyenne de 2,9 fois le diamètre de la canopée, mais variaient entre 1,68 et 3,77 selon les espèces. La dispersion des racines est asymétrique sous la canopée, influencée par les obstacles ou les arbres penchés.
Diamètre du tronc comme prédicteur	<ul style="list-style-type: none"> Communément utilisé par les municipalités pour établir les zones de protection des arbres. Une corrélation plus forte avec la hauteur de l'arbre est présente ; une asymptote se produit à un diamètre de tronc de 25 à 30 cm. Pendant la croissance, le ratio moyen prédictif est de 38:1 (38 cm de racine par 1 cm de tronc chez les jeunes arbres ; ralentissement chez les arbres plus âgés). Les ratios de zone de protection recommandés varient de 6:1 pour les arbres jeunes/tolérants à 18:1 pour les espèces anciennes/sensibles. L'estimation du diamètre du tronc pour la dispersion des racines doit tenir compte des variations, de la dispersion irrégulière et des contraintes physiques.

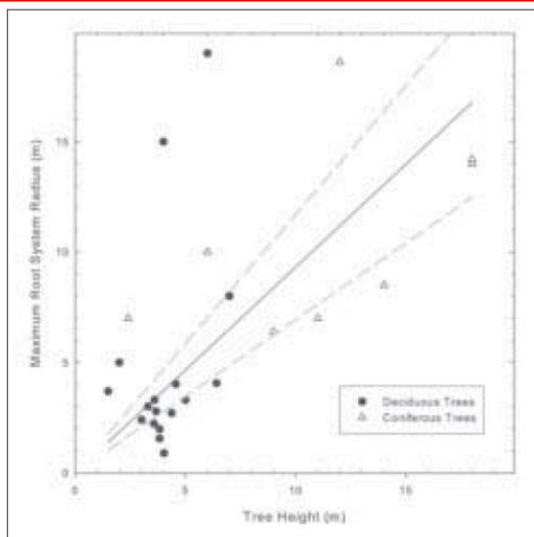


Figure 1. The relationship between tree height and maximum root radius from summarized literature. $R^2 = 0.359$ and $p = 0.002$. Dashed lines represent 95% confidence interval. When data for conifers and deciduous species were analyzed separately, data was transformed to achieve a more constant variance and relationships were as follows: Deciduous: $p = 0.25$ and $R^2 = 0.09$ Conifers: $R^2 = 0.28$ $p = 0.18$. Each data point represents a study average, see Appendix for data sources and N values.

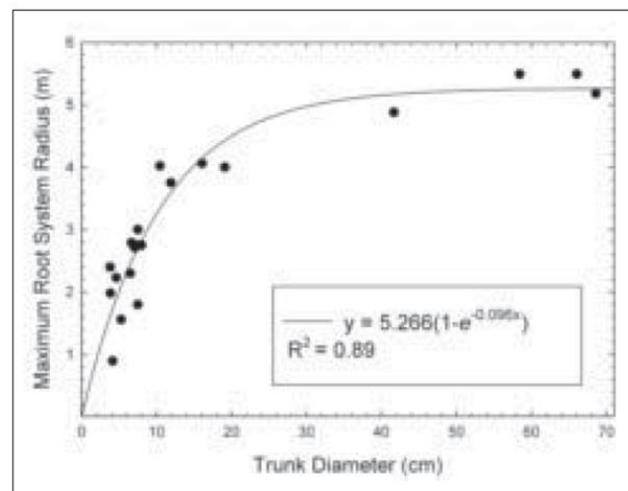


Figure 2. The relationship between trunk diameter and maximum root radius from summarized literature. Each data point represents a study average, see Appendix for data sources and N values.

Figure 9 : Deux relations pour estimer la masse racinaire utilisant la hauteur (1) et le diamètre (2) de l'arbre (Day et al. 2010a; Fig. 1 et Fig. 2)

D'autres études recommandent une distance minimale de 0,3 m pour chaque 2,5 cm de diamètre de tronc (Harris, 1983 ; Morell, 1984), bien que, là encore, les données à l'appui de cette recommandation soient difficiles à retracer. Enfin, le guide des meilleures pratiques élaboré par une municipalité britannique recommandait des distances de sécurité en fonction de la taille de l'arbre (Fig. 10).

D'un point de vue gouvernemental, les règlements tchèques concernant les distances minimales d'installation sécuritaire sont fixés par type de réseau, indépendamment de la taille de l'arbre : pour les égouts, le chauffage et le gaz, 2,5 m et pour l'eau, l'électricité et les communications, 1,5 m (Prax & Ermák, 2004). Les normes britanniques reflètent la recommandation de Watson (1990) de 0,15 m de distance par tranche de 2,5 cm de diamètre (British Standard Institute, 1989), et les normes américaines adoptent les recommandations de Harris (1983) et Morell (1984), préconisant une distance de 0,3 m par tranche de 2,5 cm de diamètre (American Society of Consulting Arborists, 1989). Le National Joint Utilities Group recommande trois niveaux de protection variables (Fig. 11) : zone interdite, zone de précaution et zone autorisée (National Joint Utilities Group, 2007). Au Québec, les directives stipulent qu'une ZPO de 12 fois le diamètre de l'arbre (pour les arbres jeunes ou en bonne santé) et de 15 fois le diamètre de l'arbre (pour les arbres plus âgés ou plus sensibles) doivent être établies (BNQ, 2018).

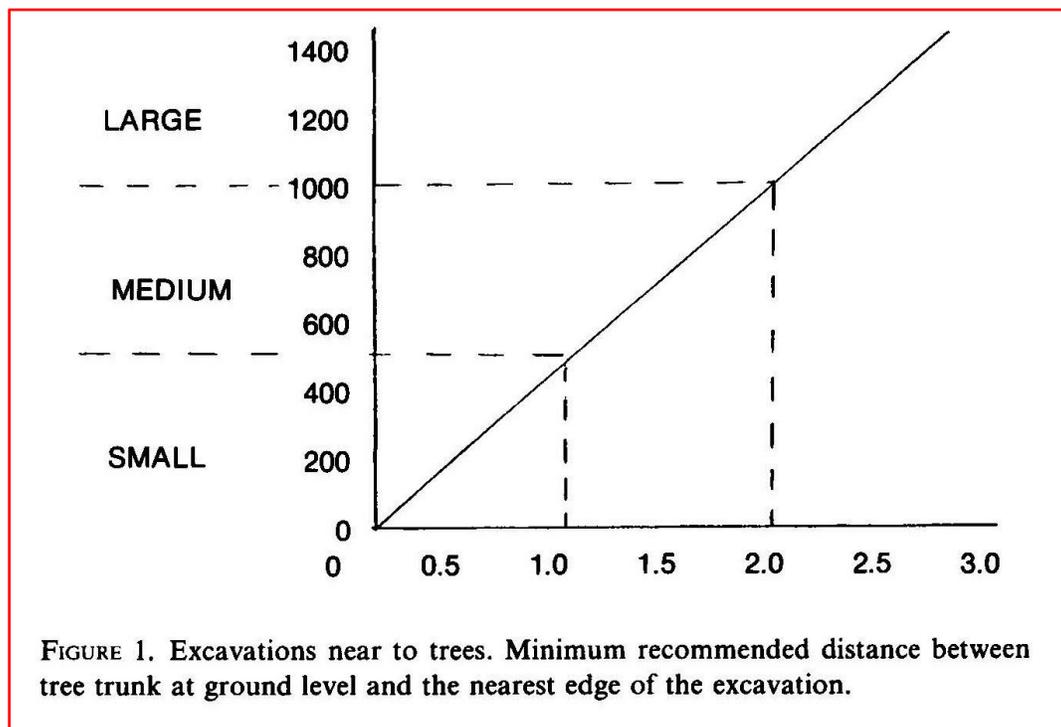


Figure 10 : Proposition de distance minimale entre l'arbre et les travaux d'excavation selon la taille de l'arbre (Hetherington 1994; Fig. 1).

Par conséquent, même entre les organismes de réglementation, il existe une grande variété de recommandations. Il ne semble pas y avoir de règle unique universellement applicable qui convienne à toutes les situations. De plus, peu d'études existent pour tester si les normes existantes de ZPO sont efficaces pour remplir leur objectif. En outre, certains soulignent l'importance d'utiliser à la fois une zone critique des racines (CRZ) en plus d'une ZPO, mais cela est encore moins étudié dans la littérature (Yusufu Kachaka, 2021; Fig 12). Pour des exemples supplémentaires et des conseils sur les directives et normes actuelles pour l'établissement des ZPO, le Tableau 3 résume les distances minimales trouvées dans la littérature grise.

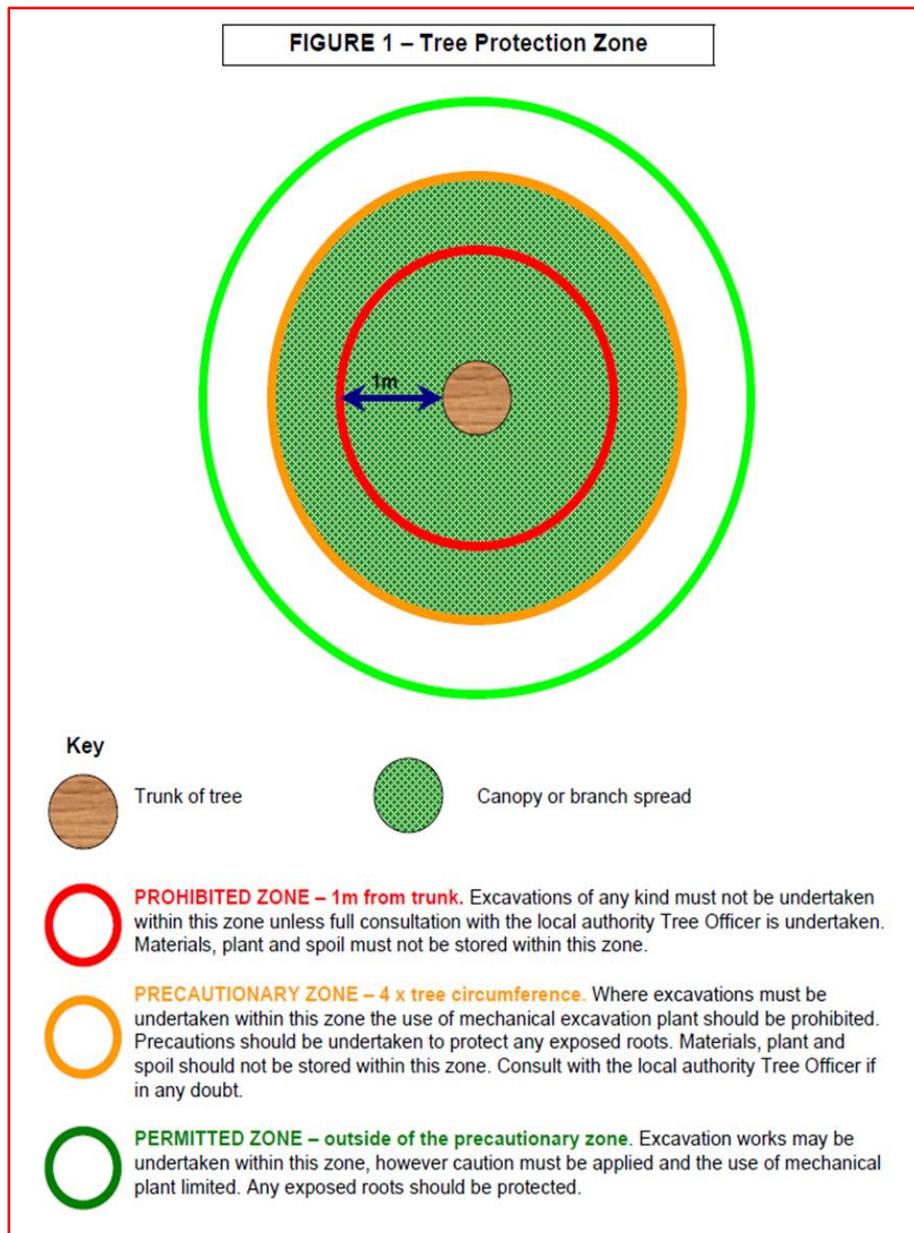


Figure 11 : Trois zones de protection de l'arbre en milieu de construction proposées par le National Joint Utilities Group. Zone interdite (rouge), zone de précaution (jaune), et zone autorisée (vert).

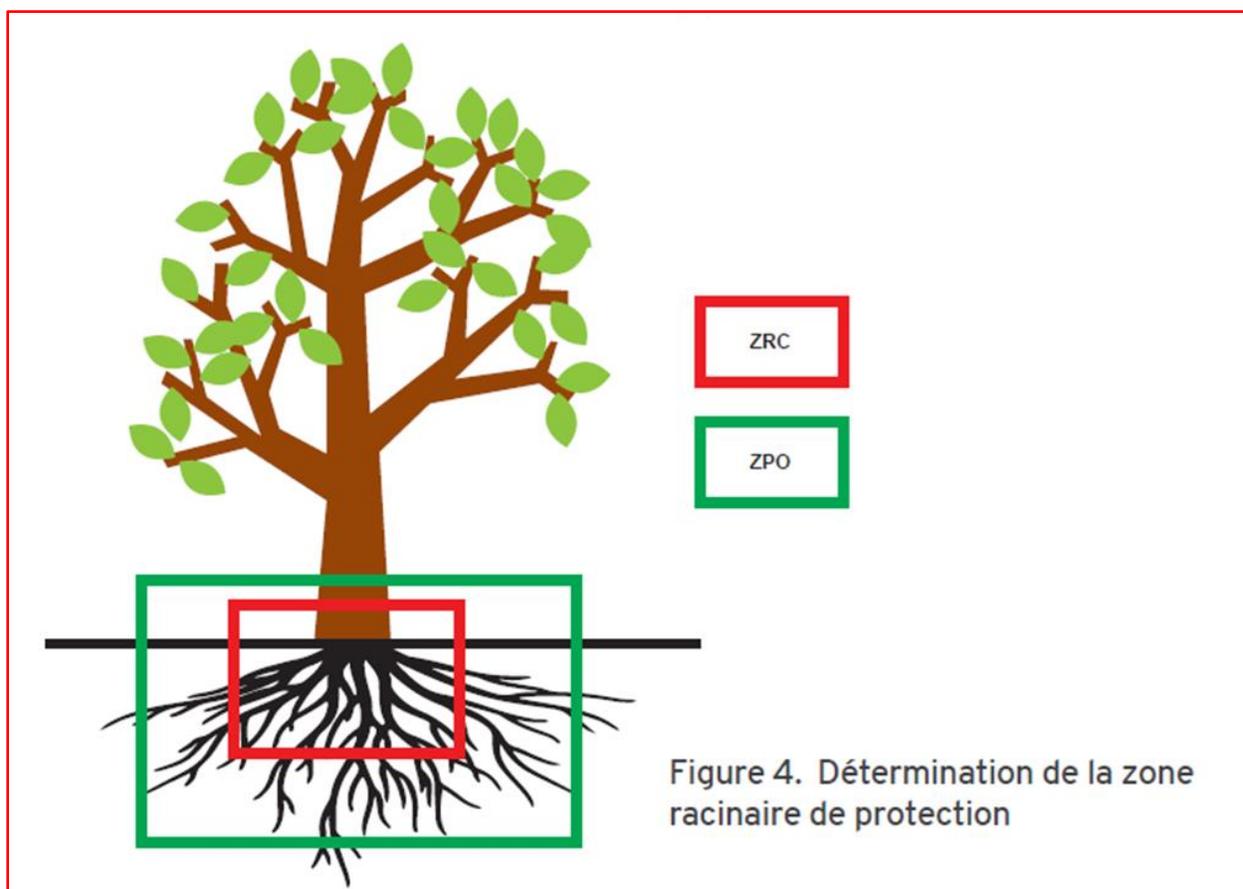


Figure 12 : Illustration de la zone critique des racines (CRZ) et de la zone de protection optimale de l'arbre (ZPO). Yusufu Kachaka, 2021; Fig.4).

Tableau 3. Résumé des recommandations de protection de l'arbre en zone de construction selon la littérature grise consultée

Ville/Institution	Recommandation/Règle/Guide	Citation
Ville de Montréal, Québec	ZPO = DHP x 10	(Ville de Montréal, 2002)
Ville de Brantford, Ontario	Une distance de 3 m des services souterrains est recommandée pour les arbres de rue	(City of Brantford, 2023a)
Ville de Calgary, Alberta	Tout travail dans un rayon de 6 m d'un arbre nécessite un plan de protection des arbres et un accord	(City of Calgary, 2019)
Ville de Maple Ridge, Ontario	Distances minimales de plantation sécuritaires pour les arbres par rapport à : - les puisards et les égouts 2m - les regards d'entretien 1.2m - les systèmes d'égouts et d'eau 1.5m	(City of Maple Ridge, 2023)
Ville de Medicine Hat, Alberta	Un plan de protection est requis pour les travaux à moins de 4m d'un arbre. ZPO	(City of Medicine Hat, 2020)
Ville de Esquimalt, Vancouver	ZPO de 0.3m pour chaque 2.5cm de DHP et consultation avec un arboriste	(Esquimalt, n.d.)
Université d'État du Colorado, USA	Prévenir les dommages coûte moins cher que de les réparer & exiger un plan de protection des arbres. ZPO = projection de la couronne pour les arbres plantés au cours des quatre dernières années. ZPO = 0.3m pour chaque 2.5cm de DHP pour les arbres plus anciens	(Bernard et al., 2003; Dennis & Jacobi, 2020; Sillick & Jacobi, 2013)
Ville de Guelph, Ontario	Inventaire des arbres et TPP requis pour tous les arbres de plus de 10cm de diamètre DBP pouvant être affectés. ZPO = projection de la couronne plus 1m OU 1.2-6m en fonction des catégories de DHP pour les arbres de rue. ZPO = projection de la couronne plus 1m OU 2.4-12m en fonction des catégories de DHP pour les arbres d'une importance particulière (parc, patrimoine, etc.)	(City of Guelph, 2019)
Ville de London, Ontario	ZPO = projection de la couronne OU 1.2-6m en fonction des catégories de DHP pour les arbres de rue	(City of London, 2003)
Ville de Springwater, Ontario	ZPO = projection de la couronne OU 1.8-6m en fonction des catégories de DHP pour les arbres de rue	(Township of Springwater, 2019)
Ville de Toronto, Ontario	ZPO = 1.2-6m en fonction des catégories de DHP pour les arbres de rue. ZPO = projection de la couronne ou 1.2-12m en fonction des catégories de DHP pour les arbres d'une importance particulière (parc, patrimoine, etc.)	(Miladinovic, 2016)
Ville de Vancouver, Colombie-Britannique	Distances minimales de plantation pour : Eau = 2m, Égout = orientation pour éviter les arbres, distance supérieure à 1.5m ou 6x DHP ZPO = 6x DHP Distance entre les services publics = 0.9m	(City of Vancouver, 2016, 2019)
Revue : Protection des arbres pendant la construction	ZPO = projection de la couronne pour les arbres jeunes/petits, recommandations BNQ pour les autres La protection des racines critiques diffère selon la région. Normes australiennes : (diamètre de l'arbre X 50)0.42 x 0.64	(Yusufu Kachaka, 2021)
Nature Québec	Distances minimales de plantation = 1.2m pour arbre colonnaire, 2m pour petit arbre feuillu ou conifère, 4m pour grand arbre feuillu	(Deshaies et al., 2021)
Hydro-Québec	Distance de plantation sécuritaire de 1.5m ou 3m en fonction de l'espèce	(Hydro-Québec, 2022)

3.1.2 L'utilisation des technologies sans tranchée

En général, la technologie sans tranchée fait référence à une méthodologie pour installer, remplacer ou améliorer les systèmes de réseaux enfouis qui peuvent minimiser les coûts sociaux et environnementaux avec un minimum de perturbation de la surface pour poser ou réhabiliter des tuyaux. Ils sont la technologie de construction dont la croissance est la plus rapide et ont longtemps été proposés comme moyen pour mieux protéger la santé des arbres lors de la construction, de l'installation et de la réparation des réseaux souterrains (Jung & Sinha, 2007 ; Thomson & Rumsey, 1997). Ces avantages pour les arbres comprennent, entre autres (Jung & Sinha, 2007 ; Ridgers et al., 2006 ; Thomson & Rumsey, 1997) :

- Réduction des dommages aux racines : Les méthodes sans tranchée minimisent les perturbations des racines, car elles impliquent peu d'excavation, réduisant ainsi les dommages aux racines des arbres par rapport aux méthodes traditionnelles à ciel ouvert.
- Préservation de la structure du sol : Ces méthodes préservent la structure du sol autour des arbres, réduisant le compactage du sol et maintenant un environnement plus sain pour la croissance des racines.
- Préservation de la vitalité des arbres : La perturbation minimale du système racinaire contribue à maintenir la vitalité et la santé des arbres, réduisant le risque de déclin ou de mortalité.
- Moins de perturbation du sol : Les technologies sans tranchée créent une perturbation minimale du sol en surface, préservant l'écosystème autour des arbres et maintenant un environnement sain pour leur croissance.
- Perturbation minimale : La réduction des perturbations en surface aide à minimiser le stress sur les arbres, à préserver leur stabilité et à réduire le risque de chutes d'arbres.

Cependant, bien que les technologies sans tranchée offrent des avantages significatifs pour préserver la santé des arbres lors des travaux sur les réseaux souterrains, elles entraînent également certains coûts initiaux et des impacts potentiels pour les entreprises de réseaux, qui doivent être soigneusement pris en compte et gérés lors de la planification et de l'exécution des projets. Cela peut inclure, mais sans s'y limiter (Jung & Sinha, 2007 ; Ridgers et al., 2006 ; Thomson & Rumsey, 1997) :

- Investissement initial : la mise en place des technologies sans tranchée peut impliquer des coûts initiaux plus élevés en raison de l'équipement spécialisé et de la main-d'œuvre qualifiée nécessaires pour leur fonctionnement.
- Formation et expertise : une formation adéquate et une expertise sont nécessaires pour l'application réussie de ces méthodes, ce qui peut impliquer des coûts supplémentaires pour former le personnel de l'entreprise de réseaux ou pour engager des entrepreneurs spécialisés.
- Risque de retards de projet : les méthodes sans tranchée peuvent être sensibles aux conditions du site et aux obstacles inattendus, ce qui pourrait entraîner des retards de projet et des coûts supplémentaires pour les entreprises de réseaux.
- Adaptation de l'infrastructure : l'infrastructure existante peut nécessiter des modifications pour accueillir les méthodes sans tranchée, ce qui pourrait entraîner des dépenses supplémentaires.

- Risque d'échec : si elles ne sont pas exécutées correctement, les techniques sans tranchée pourraient présenter un risque d'échec ou d'installation inadéquate, entraînant des dommages potentiels et des coûts de réparation supplémentaires.
- Conformité réglementaire : les entreprises de réseaux doivent se conformer à des réglementations spécifiques et à des directives liées aux méthodes sans tranchée, garantissant la sécurité environnementale et structurelle, ce qui pourrait augmenter leurs coûts opérationnels.

Plusieurs types de techniques sans tranchée existent, concernant soit l'installation, la réhabilitation ou l'évaluation des systèmes d'infrastructure municipaux (Jung & Sinha, 2007). Celles-ci peuvent être bénéfiques non seulement du point de vue de la végétation, en limitant la coupure des racines et la compaction du sol, mais aussi du point de vue humain en limitant certains effets secondaires négatifs des travaux de construction (Jim, 2003 ; Jung & Sinha, 2007). Elles réduisent l'impact et la pollution (air, bruit, eau) des travaux de tranchée et améliorent la sécurité des travailleurs (Jung & Sinha, 2007). De plus, les technologies sans tranchée offrent des perturbations de surface minimales, diminuant l'impact sur les autres réseaux, les entreprises locales, les résidents, la circulation piétonne et routière (Jung & Sinha, 2007). Les différents types de méthodes, ainsi que des exemples, des descriptions, des avantages, des inconvénients et des types de réseaux pour lesquels elles sont appropriées, sont présentés dans le Tableau 4. Certaines de ces méthodes sont également illustrées dans les Fig. 13 et 14.

Tableau 4. Descriptions, avantages, inconvénients, et réseaux appropriés pour les méthodes sans tranchée liées à l'installation, à la réhabilitation ou à l'évaluation des systèmes d'infrastructure municipaux (basé sur les informations de : Alani & Lantini, 2020 ; Jaw & Hashim, 2013 ; Jung & Sinha, 2007 ; Lester & Bernold, 2007 ; Rogers et al., 2012 ; Thomson & Rumsey, 1997).

Méthode	Description de la méthode	Avantages de la méthode	Inconvénients de la méthode	Réseaux souterrains appropriés
INSTALLATION				
Forage Directionnel Horizontal (HDD)	Utilise des appareils de forage pour installer des tuyaux ou des conduits sous terre sans tranchée.	Minimise les perturbations en surface, réduit l'impact environnemental, installation sous obstacles.	Coûts initiaux plus élevés, limitations de longueur et de diamètre de forage, risque de problèmes de stabilité du sol.	Eau, Gaz, Télécommunications
Microtunnelage	Processus de pose de conduites guidé à distance à l'aide d'une machine de forage de microtunnel.	Installation précise, perturbation minimale de la surface.	Coûts initiaux élevés, nécessite des opérateurs qualifiés et une planification précise.	Égouts, Eau, Gaz
Gainage par éclatement de conduite	Implique la rupture de la conduite existante et le tirage simultané	Remplace les anciennes conduites sans	Limité à certains diamètres de conduites, risque	Égouts, Eau, Gaz

Méthode	Description de la méthode	Avantages de la méthode	Inconvénients de la méthode	Réseaux souterrains appropriés
	d'une nouvelle conduite de même diamètre ou de diamètre plus grand.	excavation, fonctionne avec divers matériaux de conduite.	de compaction ou de fracturation du sol.	
Moulage par percussion	Utilise des outils pneumatiques pour créer un trou de forage pour l'installation des réseaux sans excavation extensive.	Installation rapide, perturbation minimale de la surface.	Restreint à des types de sols spécifiques, limité pour de plus longues distances.	Eau, Gaz, Télécommunications
Forage directionnel	Utilise un équipement de forage spécialisé pour créer des trous de forage à des angles variés sans perturbation de surface.	Polyvalent, adapté à diverses conditions de sol.	Coût élevé de l'équipement, difficile pour une navigation précise.	Eau, Gaz, Télécommunications
Fonçage	Pousse des conduites dans le sol derrière un bouclier ou un manchon, déplaçant le sol et créant un canal souterrain.	Installation relativement rapide, perturbation minimale.	Limité pour les distances plus courtes, nécessite une planification initiale approfondie.	Égouts, Eau, Gaz
Gainage par damage	Utilise des impacts répétés pour faire passer des gaines d'acier dans le sol pour l'installation de conduites.	Fonctionne bien dans les sols rocailloux, installation rapide.	Limité pour les longues distances, risque de perturbation du sol.	Égouts, Eau, Gaz
Forage à la tarière	Implique l'utilisation d'une tarière rotative pour créer un trou de forage pour l'installation de conduites sous routes, voies ferrées, etc.	Adapté aux sols stables, moins de perturbation qu'une coupe ouverte.	Limité à des types de sol spécifiques, peu adapté aux sols rocailloux.	Égouts, Eau, Gaz
Forage au jet d'eau	Utilise des jets d'eau à haute pression pour créer des trous pour l'installation des réseaux, minimisant l'excavation.	Moins invasif, adapté à diverses conditions de sol.	Vitesse d'installation plus lente, nécessite des opérateurs qualifiés.	Eau, Gaz, Télécommunications

Méthode	Description de la méthode	Avantages de la méthode	Inconvénients de la méthode	Réseaux souterrains appropriés
RÉHABILITATION				
Gainage par polymérisation sur place	Implique l'insertion d'une doublure flexible dans une conduite endommagée et son durcissement en place pour créer une nouvelle conduite solide à l'intérieur de l'ancienne.	Perturbation minimale de la surface, augmente la capacité de débit.	Limité à certaines tailles de conduites, réduction potentielle du diamètre de la conduite.	Égouts, Eau, Gaz
Gainage par éclatement de conduite	Implique la rupture de la conduite existante et le tirage simultané d'une nouvelle conduite de même diamètre ou de diamètre plus grand.	Remplace les anciennes conduites sans excavation, fonctionne avec divers matériaux de conduite.	Limité à certains diamètres de conduites, risque de compaction ou de fracturation du sol.	Égouts, Eau, Gaz
Gainage sans espaces annulaires	Implique l'installation d'un revêtement ajusté à l'intérieur d'une conduite existante, qui adhère à la paroi intérieure et crée une nouvelle conduite.	Réduit les frottements, restaure l'intégrité structurelle.	Nécessite de la précision, limité à des diamètres de conduites spécifiques.	Égouts, Eau, Gaz
Gainage par alésage	Utilise un dispositif mécanique pour retirer la surface intérieure d'une ancienne conduite et installer simultanément une nouvelle conduite à sa place.	Remplace les anciennes conduites sans excavation, fonctionne avec divers matériaux de conduite.	Limité à des tailles de conduite spécifiques, problèmes opérationnels potentiels.	Égouts, Eau, Gaz
Gainage par doublure de glissement	Implique l'insertion d'une conduite de plus petit diamètre dans une conduite existante, laissant un espace entre elles pour un support structurel.	Préserve la structure existante, réduit les restrictions de débit.	Réduction de la capacité de débit, risque d'effondrement.	Égouts, Eau, Gaz
Gainage par projection de béton	Projeté du béton à l'intérieur d'une conduite endommagée pour créer une nouvelle surface de conduite renforcée.	Fournit un renforcement structurel, rentable.	Nécessite des applicateurs qualifiés, limité à des conditions de conduite spécifiques.	Égouts, Eau, Gaz

Méthode	Description de la méthode	Avantages de la méthode	Inconvénients de la méthode	Réseaux souterrains appropriés
ÉVALUATION				
Outil d'Évaluation de Scénario par Simulation (OESS)	Méthode acoustique pour détecter les fuites et localiser les réseaux.	Non-destructif, identifie les fuites et l'emplacement des réseaux.	Précision limitée dans certaines conditions, opérateurs qualifiés requis.	Égouts, Eau, Gaz
Vidéo Surveillance en Circuit Fermé (VSCF)	Utilise des caméras pour inspecter l'état des conduites depuis l'intérieur.	Fournit une évaluation visuelle, identifie les problèmes.	Accès limité dans certaines conduites, nécessite un nettoyage avant l'inspection.	Égouts, Eau, Gaz
Essai non destructif	Diverses méthodes pour évaluer l'intégrité des structures ou des matériaux sans causer de dommages.	Identifie les défauts ou les faiblesses, ne cause pas de dommages aux réseaux.	Limité aux évaluations de surface, nécessite une interprétation.	Égouts, Eau, Gaz
Inspection visuelle intérieure	Implique le personnel pénétrant dans les structures souterraines pour une inspection visuelle.	Observation directe, identifie des problèmes spécifiques.	Préoccupations en matière de sécurité, accès limité à certaines zones.	Égouts, Eau, Gaz
Radar à pénétration du sol	Utilise des ondes électromagnétiques pour détecter des objets et structures enfouis.	Haute précision pour localiser les objets, non invasif.	Pénétration limitée dans certaines conditions de sol.	Tous les réseaux
Induction électromagnétique	Détecte les réseaux enfouis en induisant des courants dans les matériaux conducteurs souterrains.	Localisation efficace des réseaux, non destructive.	Précision affectée par les propriétés du sol, nécessite une interprétation qualifiée.	Égouts, Eau, Gaz

Une technologie sans tranchée a gagné en popularité ces dernières années : le **radar à pénétration de sol (GPR)**. Il a été précédemment mentionné que localiser les racines en dessous de la surface peut être difficile, ce qui peut non seulement être imprévisible en ce qui concerne la déviation autour des structures souterraines existantes, mais peut également varier en fonction de l'âge et de l'espèce des arbres (Klimenta et al., 2010 ; Watson et al., 2014). Ainsi, le GPR peut s'avérer utile pour cartographier les systèmes racinaires avant et pendant les travaux d'utilité - en particulier en ce qui concerne l'établissement des zones de protection des arbres (Klimenta et al., 2010). Le GPR a le potentiel de localiser des racines avec des diamètres aussi petits que 1 cm et à des profondeurs allant jusqu'à 2 m (Watson et al., 2014), et cela sous

différents types de surfaces imperméables (Nichols et al., 2017). Néanmoins, il existe des limitations. La précision des résultats du GPR variait en fonction du type de sol, de la profondeur de la sous-base de l'agrégat et de la masse d'eau contenue à la fois dans le sol et dans les objets enterrés lors du processus de calibration (Nichols et al., 2017). De plus, les signaux réfléchis peuvent présenter des échos non désirés lorsque le sable, l'argile, ou des roches sont rencontrés (Jaw & Hashim, 2013). Finalement, le GPR ne peut pas détecter les racines verticales ni celles avec moins de 20 % de teneur en eau, et il reste difficile de les distinguer des racines étroitement regroupées (Watson et al., 2014).

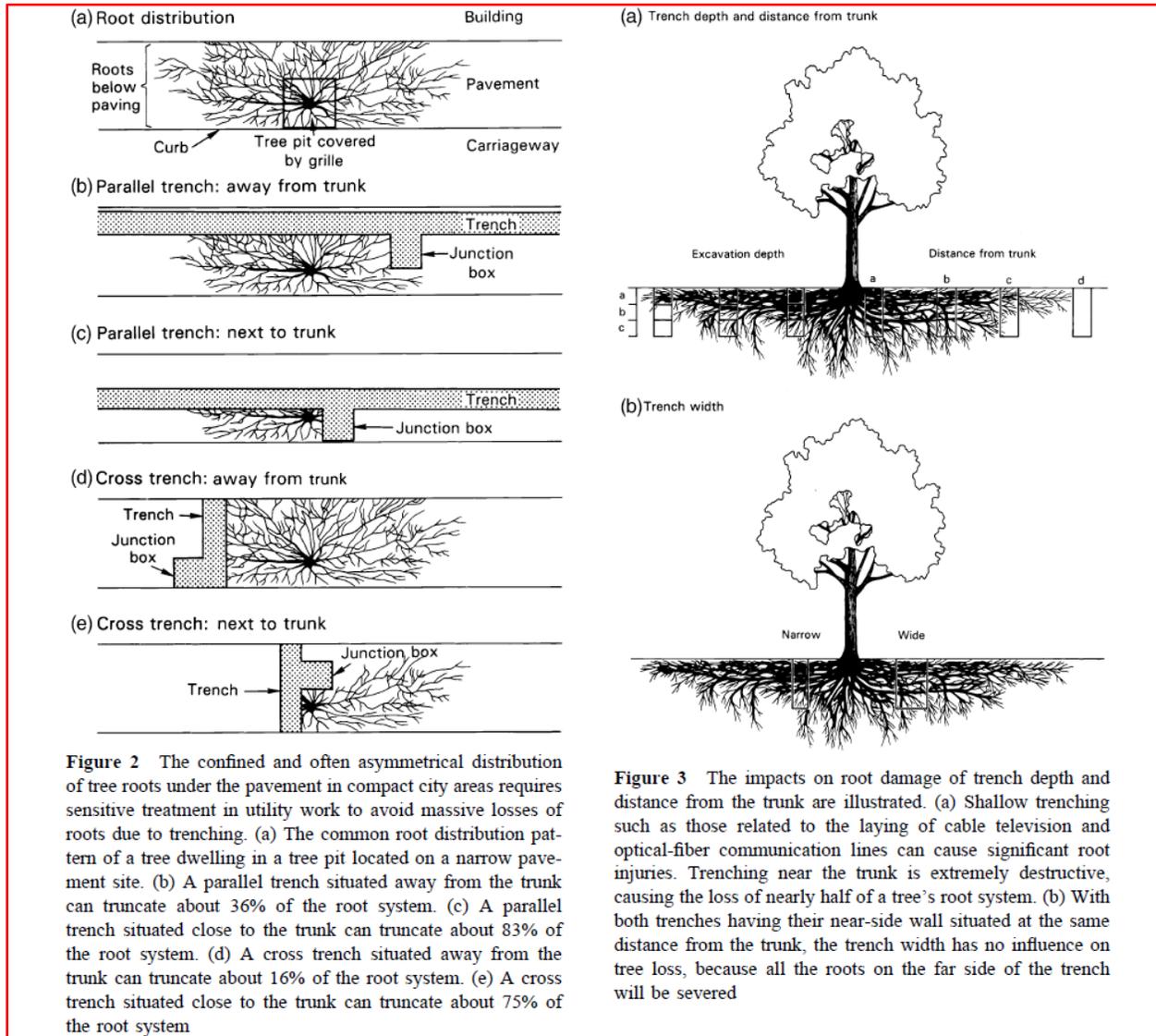


Figure 13 : Exemples de méthodes sans tranchée proposées (Fig. 2) ainsi que les endroits d'impacts (Fig. 3) – prises de Jim 2003.

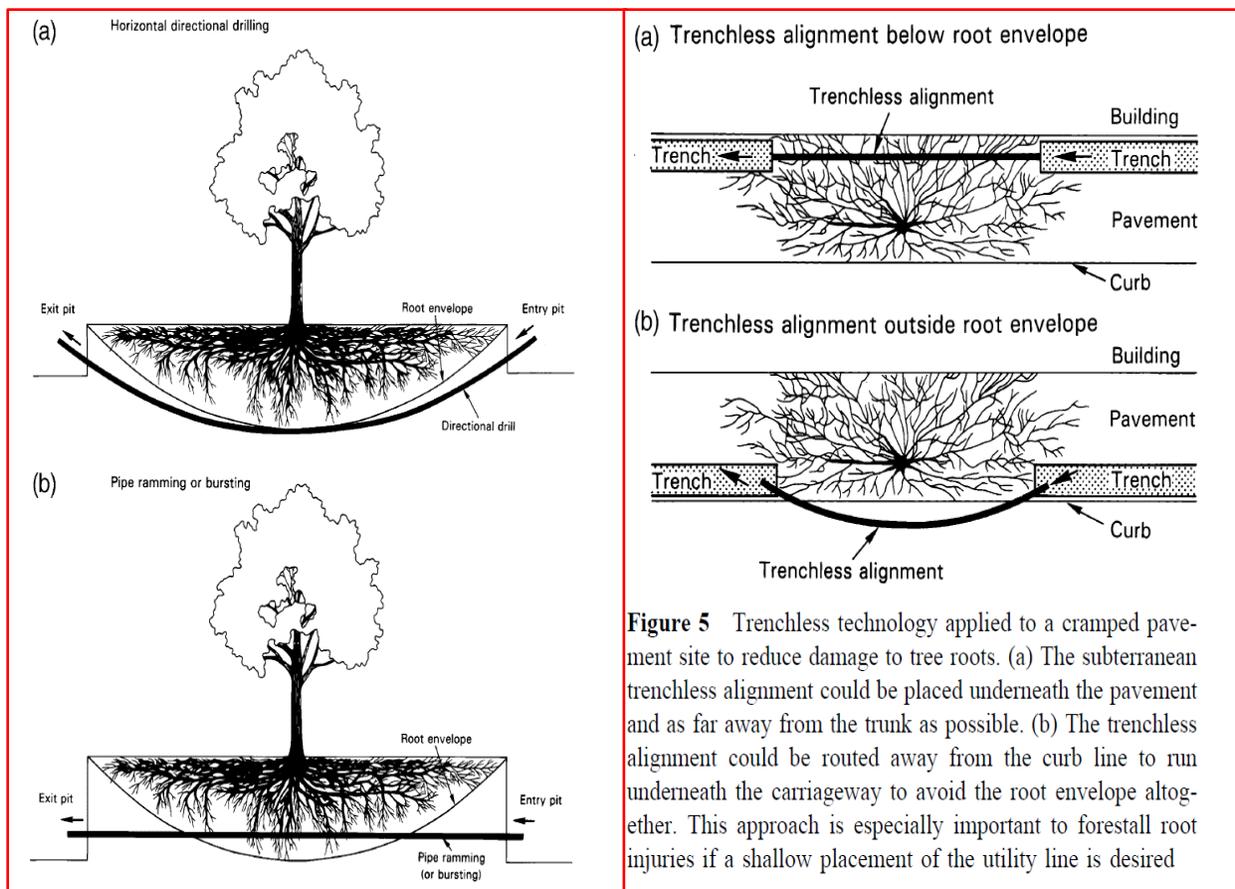


Figure 14 : Exemples de méthodes sans tranchée proposées dans Jim 2003 (Fig. 5).

Il peut également être utilisé pour détecter d'autres réseaux souterrains - une étude a révélé un grand succès dans la localisation de câbles souterrains en utilisant différentes méthodes de filtrage pour le GPR, la détection par paquet d'ondes (TIWPD) étant la plus efficace (Lester & Bernold, 2007). Cependant, certains soulignent la difficulté occasionnelle de distinguer entre les tuyaux ou les câbles et d'autres matériaux réfléchis tels que les roches (Jaw & Hashim, 2013). En outre, il existe d'autres méthodes non destructives pour l'étude des racines, en plus du GPR, notamment la tomographie électrique de résistivité et la réfraction sismique (Leucci, 2010). De plus, la liste suivante de techniques nous permet également de détecter, de cartographier et d'évaluer l'infrastructure souterraine des réseaux dans les villes (Jaw & Hashim, 2013 ; Rogers et al., 2012) :

1. Techniques visuelles :
 - Télévision en Circuit Fermé (CCTV)
 - Technologie de Balayage et d'Évaluation des Égouts (SSET)
2. Techniques Électromagnétiques et Radiofréquences :
 - Fuite de Flux Magnétique (MFL)
 - Techniques à Courant de Foucault
 - Technologie d'Hydroscope
 - Analyse Rapide de Perméabilité Magnétique (RMPS)

- Champ Électromagnétique à Basse Fréquence (LFEM)
 - Champs Magnétiques Passifs (PMFs)
 - Radar à Pénétration de Sol (GPR)
 - Domaine Temporel - GPR Impulsionnel
 - Domaine Fréquentiel - GPR Modulé
 - Domaine Spatial - GPR à Fréquence Unique
 - GPR dans la Conduite
 - Ultra Large Bande Temporelle (UWB)
3. Techniques acoustiques et de vibration :
 - Sonar
 - Vibro-acoustique
 - Écho d'Impact/Analyse spectrale des ondes de surface
 - Corrélateur et Bâton d'écoute pour les Fuites
 4. Techniques RFOD/Capteur
 5. Thermographie infrarouge
 6. Technique de détection par ondes de Doppler en onde continue
 7. Levés au laser
 8. Techniques combinées :
 - Électromagnétisme à large bande/Probe d'Impédance d'Onde (WIP)
 - Technique d'Évaluation en Temps Réel de l'Inspection des Conduites (PIRAT)
 9. Autres techniques :
 - Système Sahara
 - Conduites intégrées
 - Tunnel Multi-Utilitaire (MUT)

Une revue plus approfondie d'Alani et Lantini (2020) (Tableau 5) a également été réalisée, incluant certaines applications, limitations et avantages pour certaines méthodes de détection.

Enfin, l'**apprentissage automatique** a été proposé comme un moyen efficace de limiter et d'identifier les conflits potentiels entre les réseaux souterrains et les arbres. Cela est particulièrement répandu dans les systèmes d'égouts (voir la Section 3.3).

Dans les cas où une tranchée est prévue à proximité de la base d'un arbre, la Ville de Montréal (2002) recommande que la longueur du tunnel répartie également de part et d'autre de l'arbre, doit respecter les spécifications suivantes selon le diamètre des arbres mesurés à 1.4m du sol :

- 0-10cm ; tunnel de 1.5m long;
- 10-30cm ; tunnel de 2m;
- 30-50cm ; tunnel de 2.5m;
- 50cm+ ; tunnel de 3m.

Une représentation graphique (Fig. 15) prise de Yusufu Kachaka (2021) est incluse.

Tableau 5. Méthodes non destructives pour évaluer les systèmes racinaires des arbres
(Alani et Lantini, 2020; Tableau 2)

Table 2 Non-destructive testing methods for the assessment of tree root systems

Working principle	Method	Characteristics	Applications	Advantages	Limitations
Imaging	(Mini)Rhizotrons	Non-destructive Slightly invasive	Quantification of fine root growth	High-resolution imaging Frequent inspections	Modification of soil hydrology and physics Only small portions of the root system can be observed Disparity in results obtained from different image processing methods Cost of installation Expensive equipment Impossible to install in certain environments (i.e. urban trees)
Mechanical	Pulling test	Non-destructive Invasive	Assessment of tree root plate stability	Provides a safety factor for tree stability Test of the elastic response of the tree trunk	Invasive Not completely realistic (i.e. cannot simulate wind effects) Affected by temperature conditions Not useful for understanding the causes of tree instability
Electrical	ERT	Non-destructive Non-invasive	Detection of root distribution Quantification of root biomass	Ease of data collection Suitable for measurements repeated over time Various scales application Possibility of 1D, 2D and 3D surveys Depth of detection	Systematic errors due to poor electrode contact Long measurement times Laboratory calibration phase needed Non-uniqueness of the solution in the inversion scheme Difficult to discern the effect of roots from the background noise for low root biomass
Acoustic	Acoustic detection	Non-destructive Slightly invasive	Detection of roots	Successful detection of coarse roots	Small roots (diameter < 4 cm) are not detected Superficial depth of detection (< 50 cm) High sensitivity to water content Difficult to discern roots from other buried objects

Table 2 (continued)

Working principle	Method	Characteristics	Applications	Advantages	Limitations
Electromagnetic	X-ray CT	Non-destructive Non-invasive	3D mapping of roots Quantification of root length and diameter	High-resolution imaging Suitable for measurements repeated over time Detection of fine roots	Difficulty in distinguishing the boundary between roots and other materials High dependence on soil-related factors (i.e. soil type, soil moisture content, presence of organic matter or air-filled pores, root water status) Overestimation of root diameter Underestimation of root length Complex image processing
	GPR	Non-destructive Non-invasive	3D mapping of roots Quantification of root length Dielectric properties measurements	Totally non-invasive Easy to use High-resolution imaging Suitable for measurements repeated over time Different frequencies for different objectives Can be used on valuable trees Capable of finding roots under pavements	Difficulty of data interpretation Fine roots are not detected Impossible to distinguish clusters of roots

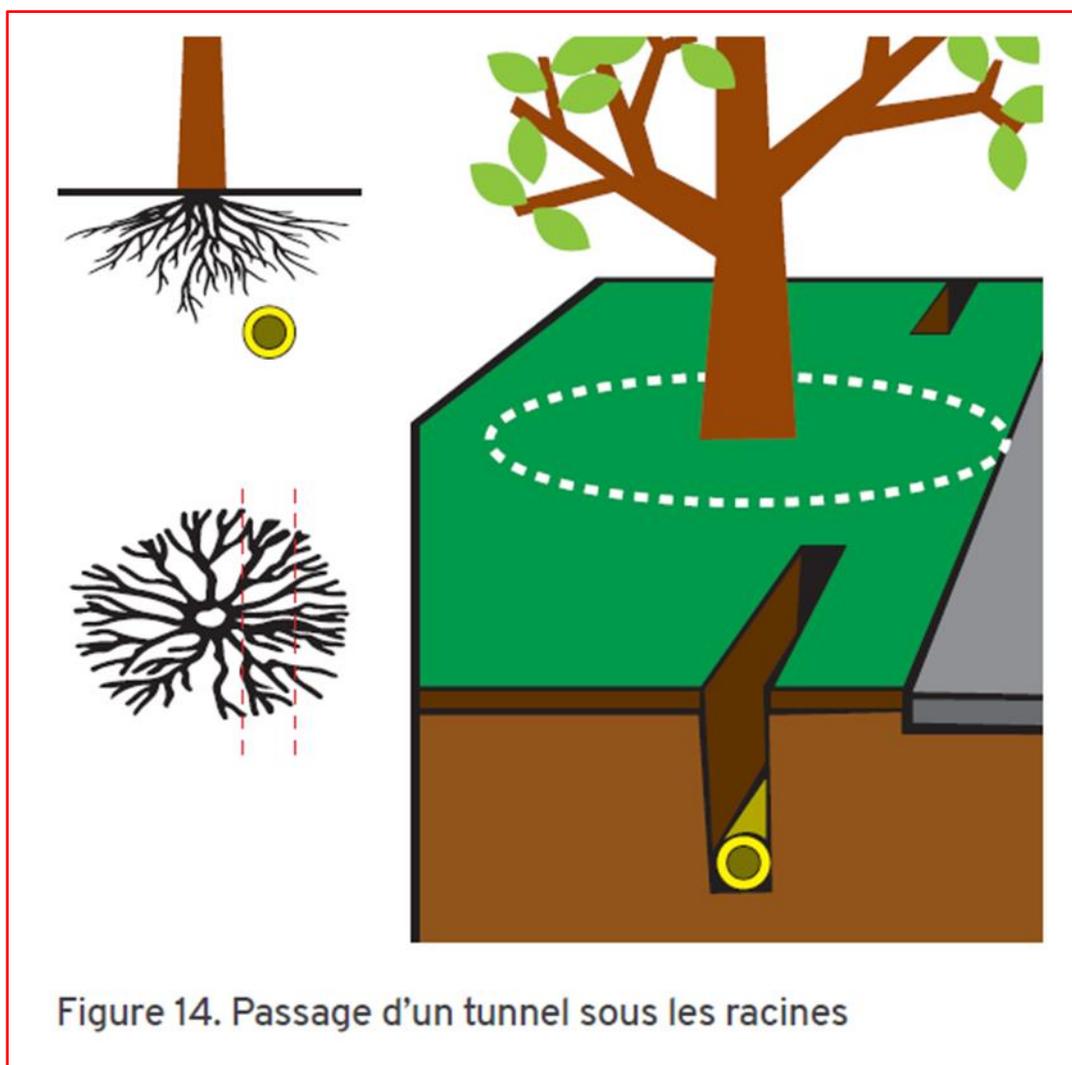


Figure 15 : Illustration pour une tranchée prévue à proximité de la base d'un arbre (Yusufu Kachaka 2021; Fig. 14).

3.1.3 Recommandations générales suite d'une section accidentelle ou inévitable des racines

Il peut parfois être inévitable de devoir couper les racines d'un arbre, et dans ces cas, il est primordial de prendre des mesures pour limiter l'impact global de l'intervention sur la santé de l'arbre. Il est d'abord recommandé de contacter un arboriculteur ou du personnel qualifié immédiatement après la section, surtout si elle concerne une racine de plus de 25 mm de diamètre (National Joint Utilities Group, 2007). À partir de là, des soins et interventions appropriés peuvent être réalisés immédiatement, limitant ainsi l'impact global sur la santé et la stabilité de l'arbre. L'abattage de l'arbre ne devrait être envisagé que s'il est considéré comme un risque par un professionnel. Une étude a argumenté qu'il pourrait être plus judicieux et moins cher de couper un arbre sur un chantier de construction en cas d'erreur, plutôt que d'essayer de le préserver, et de le remplacer par un arbre plus jeune, qui serait plus apte à se rétablir (Perry, 1969); cela devrait être considéré au cas par cas uniquement.

Les directives actuelles concernant la protection des arbres sur les chantiers de construction exigent également que toute section soit effectuée par une **coupe nette avec un instrument tranchant** pour éviter tout effilochage et limiter ainsi les dommages (City of Guelph, 2019; Hetherington, 1994; National Joint Utilities Group, 2007; Nicklin et al., 2013; Thomson & Rumsey, 1997; Ville de Montréal, 2022; Yusufu Kachaka, 2021). De plus, il est recommandé de couper les racines de plus de 2,5 cm de diamètre plutôt que de tenter de les conserver si elles ont été endommagées ou comprimées lors des travaux (Yusufu Kachaka, 2021). Aussi, toute racine exposée aux éléments doit être **recouverte et maintenue humide** (Ville de Montréal, 2022; Yusufu Kachaka, 2021). Ces recommandations sont étayées par des conclusions de la littérature scientifique.

Dans le cas de travaux non urgents impliquant un conflit inévitable avec un arbre, **l'achèvement des travaux en dehors de la saison de croissance maximale** limiterait l'impact et le stress subséquent sur l'arbre en question. Des preuves suggèrent que la température, et donc la saisonnalité, jouent un rôle dans la récupération des racines des arbres. Une étude a découvert que deux espèces de buissons étaient largement résilientes à la taille/coupe des racines si elle était effectuée en dehors de la saison de croissance active (Mohd Idris & Cameron, 2020). De plus, une nouvelle croissance racinaire a été trouvée en corrélation positive avec la température (Watson et al., 2014).

Pour aider à la récupération des arbres, une taille compensatoire, la stimulation de la régénération des racines et l'application de suppléments nutritionnels peuvent être appropriées. Un entretien post-construction peut également être utile. La **taille compensatoire** implique la taille intentionnelle de la canopée de l'arbre pour compenser la perte involontaire de racines (Watson, 1998 ; Watson et al., 2014). Elle peut accélérer la récupération bien que son efficacité dans des environnements réels ne soit pas bien connue. La taille régulière de la canopée pourrait réduire proportionnellement la propagation des racines, mais une taille excessive pourrait causer des problèmes de santé (Shi et al., 2023). **Stimuler la régénération des racines**, et donc retrouver l'eau perdue et la disponibilité des nutriments, grâce à des techniques de coupes appropriées (ci-dessus), peut également favoriser la récupération de la croissance chez les jeunes arbres (Watson et al., 2014); les grosses racines étaient moins réactives dans leur capacité à repousser (Watson et al., 2014). Cela peut être fait grâce à des **enrichissements du sol** (ajout d'une solution de saccharose à 5%) ou à **l'utilisation d'auxines** (Watson et al., 2014). Cependant, alors que les auxines puissent favoriser une nouvelle croissance, elles peuvent également réduire l'élongation (Watson et al., 2014). Les **sols structuraux et les entretiens** peuvent aussi aider à la récupération après les travaux (Schollen & Company Inc. et al., 2017) – bien que leur utilisation et leur efficacité ne soient pas bien étudiées dans la littérature scientifique, ce qui rend les recommandations difficiles. Enfin, l'arrosage après les travaux peut aider à limiter le stress de l'arbre et favoriser sa récupération (Fini et al., 2013 ; Ville de Montréal, 2002).

3.2 Limitation des conflits avec le réseau souterrain

Pour limiter les conflits avec les réseaux de services publics, en plus des recommandations proposées concernant les distances minimales de plantation et l'utilisation de technologies sans tranchée (qui servent à protéger la santé de l'arbre), cette section fournira quelques recommandations plus ciblées qui pourraient être mises en œuvre afin de diminuer le nombre de conflits avec le réseau souterrain.

3.2.1 Distances de plantation appropriées et sélection des espèces

La sélection des espèces est également considérée comme un élément important pour limiter les conflits entre les arbres et les réseaux. En effet, différentes espèces auront des archétypes racinaires différents, variant leur profondeur, leur expansion et leur « intensité » de recherche de nutriments (Day et al., 2010a). Cependant, comme nous connaissons très peu de choses sur les systèmes racinaires des arbres dans les environnements urbains, il peut être difficile de prédire comment ils se comporteront et quels facteurs les influenceront (Day et al., 2010a, 2010b). Par conséquent, la proposition de « sélection appropriée des espèces » (Jim, 2001 ; Lantini et al., 2020 ; Ridgers et al., 2006 ; Stål, 1998) est difficile à mettre en œuvre sans les connaissances nécessaires pour la soutenir et informer ce processus de sélection. Des études ont révélé que le nombre de tiges d'arbres (densité) est un facteur important pour prédire le risque de blocage dans les égouts (Ossola et al., 2023). De plus, la présence de certaines espèces peut également accroître ce risque, mais l'identité des « espèces problématiques » variera selon l'emplacement, et certains vont jusqu'à dire que les espèces problématiques peuvent simplement être les plus abondantes dans la ville (Shi et al., 2023). Des études australiennes identifient le *Ficus macrocarpa* (Ossola et al., 2023) comme étant problématique et ont même mené une étude approfondie sur les distances de plantation sécuritaires pour plus de 200 espèces (Harris et al., 1999). Dans les zones urbaines danoises, le saule (*Salix spp.*), le bouleau (*Betula spp.*), les peupliers (*Populus spp.*) et l'orme (*Ulmus spp.*) ont été mentionnés comme étant les espèces causant le plus de problèmes d'intrusion de racines dans les égouts (30 %, 25 %, 23 % et 6 %, respectivement ; (Randrup, 2000). En Pologne, il a été constaté que la plupart des intrusions dans les égouts provenaient de l'une des 4 espèces suivantes : *Populus alba* (64,97 %), *Tilia cordata* (16,88 %), *Acer platanoides* (11,91 %) et *Aesculus hippocastanum* (6,24 %), ainsi que de certains arbustes (Kuliczowska & Parka, 2017). Dans un sens plus général, Randrup et al. (2001), Garrick (2018) et Watson et al. (2014) suggèrent que les arbres de plus grande taille et à croissance plus rapide posent plus de conflits que les espèces plus petites et à croissance plus lente et que les conflits d'infrastructure sont « plus liés à l'âge de l'arbre, aux conditions de croissance et à la quantité de volume racinaire qu'à l'espèce de l'arbre ». Plus d'informations sont nécessaires sur ce sujet avant de formuler des recommandations concrètes.

Cependant, il convient de garder à l'esprit certains aspects lors de la sélection des espèces à planter. Ridgers et al. (2006) soutiennent que la variation entre les espèces d'arbres dans leur capacité de pénétration, leur taux de croissance, leur énergie racinaire, ainsi que l'importance du placement des arbres par rapport au type, à la profondeur et au placement des canalisations sont des facteurs importants. L'interaction entre les espèces et les conditions locales peut être

très importante pour déterminer si un conflit se produira, car une espèce plantée dans des conditions non idéales accélérera l'intrusion (Ridgers et al., 2006). Dans une revue sur les causes des dommages aux racines dans les environnements urbains, avec un fort accent sur l'infrastructure imperméable (bordures, routes, trottoirs, etc.), il a été constaté que l'espèce d'arbre était le facteur le plus important pour prédire les dommages aux racines ; et tandis que tous les arbres ne causent pas de dommages aux racines, le taux et l'étendue des dommages varient selon l'espèce d'arbre (Shi et al., 2023). Ils observent en outre que :

- La recherche est peu claire sur la corrélation entre l'espèce d'arbre et l'invasion des canalisations souterraines
- En général, les adultes avec des couronnes plus hautes et une demande en eau plus grande ont plus de chances de causer des dommages étendus, basés uniquement sur les individus qui poussent à proximité des canalisations (et pourraient donc être biaisés en raison de la fréquence à laquelle une espèce est plantée)
- Les espèces problématiques sont répertoriées dans le Tableau 6
- L'hydrotropisme du système racinaire d'une espèce peut avoir un impact

Tableau 6. Liste d'espèces causant des dommages à l'infrastructure imperméable (Shi et al., 2023; Tableau 4).

Tree species	Section	Scientific Name	Root system type	Growing area	Conditions of root damage	Reference
Poplar	Salicaceae	<i>Populus</i> .	Fibrous root system	temperate zone	Rapid growth, invading the pipeline	(Day, 1991; Kopinga, 1994)
Eucalyptus	Myrtaceae	<i>Eucalyptus spp</i>	Taproot	temperate zone		
Oak	Fagaceae	<i>Quercus palustris Münchh</i>	Taproot	temperate zone	The DBH of trees is >20 cm	(Wong et al., 1988)
European Hepatica	Aesculaceae	<i>Aesculus hippocastanum L</i>	Taproot	temperate zone		
Willow	Salicaceae	<i>Salix babylonica</i>	Taproot	temperate zone	Intrusion pipe	(Kopinga, 1994)
Camphor	Lauraceae	<i>Cinnamomum camphora (L.) Presl</i>	Taproot	Subtropical	The DBH of trees is >10 cm	(Zhang and Huang, 2009)
Ficus	Moriaceae	<i>Ficus microcarpa Linn. f.</i>	Taproot, With buttress root	Subtropical	The DBH of trees is >20 cm, and the roots grow on the ground	
Ficus virens	Moriaceae	<i>Ficus virens Ait. var. sublanccolata (Miq.) Corner</i>	Taproot, With buttress root	Subtropical	It grows fast and grows on the ground	(Zhang, 2005)
Maple tree	Hamamelidaceae	<i>Liquidambar formosana Hance</i>	Taproot	Subtropical		
Indian Rubber Tree	Moriaceae	<i>Ficus elastica Roxb. ex Hornem.</i>	Taproot	Subtropical	Fast growth, and the DBH of trees is >15 cm	(Wang et al., 2023)
Bodhi Tree	Moriaceae	<i>Ficus religiosa L.</i>	Taproot	Subtropical		
Large-leaved Mahogany	meliaceae	<i>Swietenia macrophylla King</i>	Taproot	Subtropical		
Rainwood	leguminous	<i>Samanea saman (Jacq.) Merr.</i>	Taproot	Subtropical	Big trunk	
Phoenix tree	leguminous	<i>Delonix regia (Boj.) Raf.</i>	Taproot	Subtropical	Plate root growing on the ground	(Zhang, 1999)
Melaleuca alternifolia	Myrtaceae	<i>Melaleuca leucadendron</i>	Taproot	Subtropical	Intrusion pipe	(Pohls et al., 2002)

3.2.2 Utilisation de tunnels, conduits et câbles partagés

Une recommandation proposée dans plusieurs sources était l'utilisation d'un espace partagé par des réseaux publics compatibles (Garrick, 2018 ; Jey & Jeyapalan, 2005 ; Ridgers et al., 2006 ; Slater & Chalmers, 2022). Cela impliquerait que plusieurs réseaux partageraient le même tunnel, conduit ou infrastructure dans un espace dédié aux services publics (Garrick, 2018). Ce faisant, nous pourrions limiter le volume total d'espace souterrain dédié aux réseaux et éventuellement mieux mettre en œuvre des mesures de protection (distance de plantation, barrières racinaires, etc.) pour les protéger des racines des arbres. De plus, nous pourrions réaffecter les infrastructures existantes en ajoutant de nouveaux câbles et fibres optiques dans les conduites d'égout, les conduites principales d'eau et/ou les canalisations de servitude, car ces canalisations relient déjà tous les résidents aux zones de contrôle central (Jey & Jeyapalan, 2005). Un exemple américain a vu une compagnie de téléphone autorisée à ajouter ses câbles dans des conduites d'eau potable existantes avec un grand succès, mais un autre à Paris a été abandonné en raison de résultats initiaux médiocres (Jey & Jeyapalan, 2005). Il n'y a pas beaucoup d'exemples à tirer, mais dans l'ensemble, le concept est perçu de manière positive. Cependant, certaines considérations devraient être prises en compte, par exemple, en ajustant la manière dont les conduites sont nettoyées et réparées pour tenir compte des nouveaux câbles trouvés à l'intérieur d'elles, ainsi qu'en modifiant les câbles eux-mêmes pour tenir compte des environnements « plus humides » (Jey & Jeyapalan, 2005). La Fig. 16 propose quelques conceptions de Jey et Jeyapalan (2005). De plus, cela nécessiterait beaucoup plus de coordination et de communication entre les différentes entreprises (Garrick, 2018) et il n'est pas clair si les coûts étaient plus élevés (Jey & Jeyapalan, 2005).

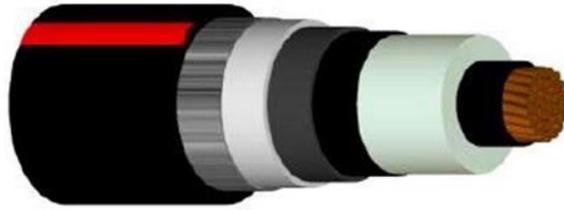


Figure I-Sample Special Cable: Single Phase

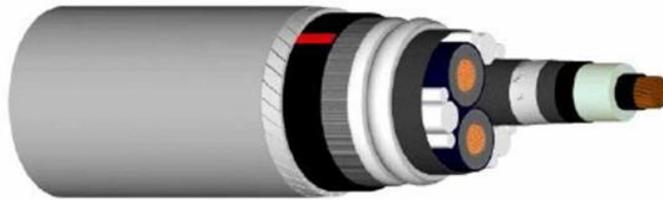


Figure II-Sample Special Cable: Three Phase



Figure III-Sample Sharing of Pipe

Figure 16 : Exemples de conduits et de câbles partagés (Jey et Jeyapalan, 2005).

3.2.3 Utilisation de barrières racinaires

Les barrières racinaires présentent une solution potentielle pour atténuer les conflits entre les racines des arbres et les réseaux souterrains dans les environnements urbains. Elles se sont avérées être un outil essentiel dans les pratiques arboricoles pour gérer et contrôler la croissance des racines en milieu urbain. À travers des barrières physiques, telles que des membranes imperméables ou des matériaux spécialisés, elles visent à rediriger ou à freiner la croissance des racines (Shi et al., 2023), empêchant leur intrusion dans les lignes de services publics. Les barrières racinaires peuvent être placées de manière stratégique pour créer une séparation physique entre les arbres et les réseaux, réduisant ainsi les risques de dommages racinaires ou d'obstruction (Barker & Peper, 1995 ; Morgenroth, 2008). Peper et Barker (1993) ont constaté que les barrières racinaires réduisaient la biomasse racinaire totale dans les 6 premiers pieds de sol dans un rayon de 3 pieds autour du tronc de l'arbre. Ainsi, une mise en œuvre efficace des barrières racinaires peut contribuer à préserver l'intégrité des réseaux souterrains en limitant la pénétration des racines, réduisant le risque de dommages structuraux ou d'obstructions dans les canalisations, câbles ou autres infrastructures de services publics (Kuliczowska & Parka, 2017 ; Randrup, 2000 ; Rolf & Stal, 1994 ; Stål, 1998). Ces barrières servent de mesures préventives, offrant ainsi un moyen de permettre une cohabitation plus harmonieuse entre les arbres et les réseaux dans les espaces urbains partagés (Shi et al., 2023). La littérature examinée suggère que lorsque les barrières racinaires sont installées et entretenues correctement, elles peuvent contribuer à gérer les conflits entre les racines des arbres et les réseaux souterrains (Morgenroth, 2008 ; Mullaney et al., 2015 ; Shi et al., 2023).

Cependant, il existe quelques problèmes potentiels à prendre en compte lors de la mise en place de barrières racinaires (Barker & Peper, 1995 ; Morgenroth, 2008 ; Mullaney et al., 2015 ; Peper & Barker, 1993).

Problèmes généraux :

- **Efficacité** : les barrières racinaires ne sont pas toujours complètement efficaces pour prévenir l'intrusion ou les dommages causés par les racines. Les racines peuvent parfois pénétrer ou contourner les barrières, en particulier en cas d'installation médiocre ou de profondeur insuffisante de la barrière.
- **Entretien** : un entretien régulier et une surveillance sont cruciaux pour l'efficacité des barrières racinaires. Si elles ne sont pas correctement entretenues, les barrières peuvent se détériorer ou se déplacer dans le temps, perdant ainsi leur fonctionnalité.
- **Coût** : les coûts d'installation et de maintenance associés aux barrières racinaires peuvent être importants. L'investissement initial et l'entretien continu pourraient poser des défis financiers.
- **Compression des Racines** : les barrières peuvent potentiellement comprimer le système racinaire dans des espaces limités, affectant la santé et la croissance de l'arbre.

Problèmes liés aux surfaces perméables :

- **Blocage de l'eau et des nutriments** : les barrières imperméables peuvent entraver le flux d'eau et de nutriments vers les racines des arbres, affectant potentiellement leur santé et leur croissance.

- **Compactage du sol** : les barrières installées dans un sol compacté ou lourd peuvent aggraver les problèmes de compactage du sol, entravant la croissance et la santé des racines.

Problèmes liés au réseau souterrain :

- **Installation Incorrecte** : une installation incorrecte des barrières racinaires près des réseaux peut entraîner des dommages accidentels aux canalisations ou câbles souterrains lors des activités d'installation ou de maintenance.
- **Incompatibilité** : différents matériaux de réseaux peuvent réagir différemment aux barrières racinaires, entraînant des problèmes imprévus tels que la corrosion ou les dommages.

Il est essentiel de prendre en compte ces défis lors de la mise en place de barrières racinaires pour éviter les inconvénients potentiels et assurer leur efficacité dans la protection des surfaces pavées et des réseaux souterrains. Malgré les avancées dans la technologie des barrières racinaires, des questions cruciales restent sans réponse quant à leur efficacité et à leur impact à long terme. La revue exhaustive de Morgenroth (2008) souligne la nécessité d'études supplémentaires sur la longévité et la dégradation des différents matériaux de barrières au fil du temps. Des questions persistent concernant l'efficacité des barrières contre les différentes espèces d'arbres, les conditions du sol et les variations climatiques. De plus, la configuration optimale (linéaire vs circulaire) et la profondeur de placement des barrières racinaires pour prévenir l'intrusion des racines tout en assurant la santé des arbres nécessitent une clarification. De plus, les répercussions écologiques, y compris les impacts potentiels sur la santé des arbres et les communautés microbiennes du sol dus à l'utilisation de barrières chimiques, nécessitent une exploration approfondie. Des efforts de recherche supplémentaires sont nécessaires pour combler ces lacunes critiques, assurant le développement de solutions de barrières racinaires plus efficaces et respectueuses de l'environnement. Bien qu'il reste de nombreuses questions sur l'efficacité globale des barrières racinaires, de nombreuses études s'accordent à dire que si elles sont correctement installées, elles peuvent être efficaces là où elles sont le plus nécessaires (Morgenroth, 2008).

Cependant, des recherches pratiques supplémentaires sont nécessaires du point de vue des réseaux publics. Les recherches actuelles et les connaissances se rapportent à l'utilisation des barrières racinaires près de structures imperméables (bordures, routes, trottoirs) et soulignent l'importance de s'assurer que les barrières sont au moins à 2 cm au-dessus de la surface du sol pour rester efficaces. Par conséquent, avec les racines et les réseaux souterrains partageant l'espace souterrain, la séparation peut ne pas être aussi facilement réalisée dans ces cas. Leur utilisation conjointe avec d'autres mesures (voir 3.2.4), cependant, peut s'avérer fructueuse.

Enfin, il existe différents types de barrières racinaires (Tableau 7). De plus, la position des barrières racinaires peut également être modifiée ; être implantées de manière linéaire ou circulaire, et considérer soit l'espace en 2D ou en 3D (Shi et al., 2023; Fig. 17). Cependant, il est encore important de noter que les différents types de barrières racinaires et leurs positions n'ont pas été spécifiquement testés par rapport aux réseaux souterrains, dans la plupart des cas, mais plusieurs pourraient néanmoins se révéler utiles.

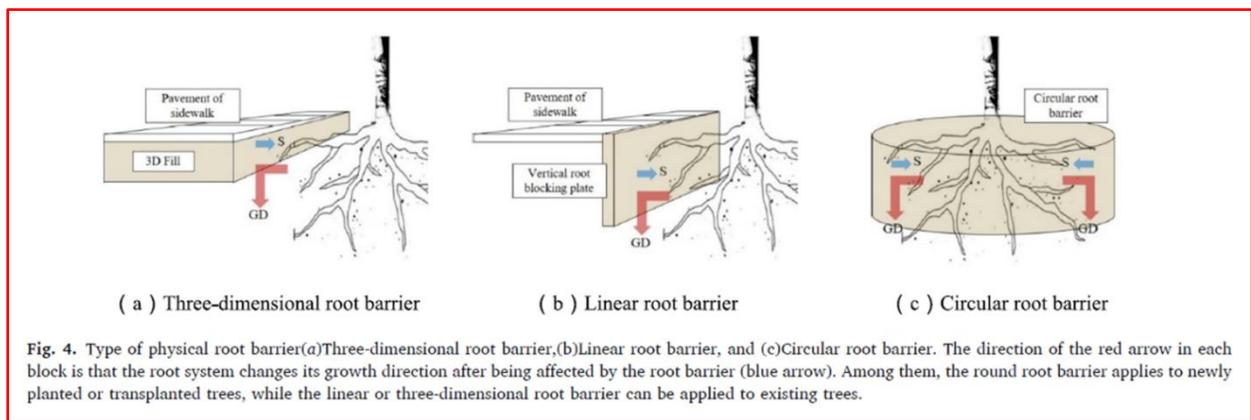


Figure 17 : Types de barrières racinaire selon Shi et al. (2023; Fig. 4).

Tableau 7. Types de barrières racinaires incluant une description générale, des exemples, ainsi que des avantages et inconvénients pour chacun. Information prise de : Barker & Peper, 1995 ; Morgenroth, 2008 ; Mullaney et al., 2015 ; Pepper & Barker, 1993

Types de barrières racinaires	Descriptions générales	Exemples	Avantages	Inconvénients
Géotextiles	Tissu perméable restreignant la croissance	- Géotextiles tissés - Géotextiles non tissés	- Permet le passage de l'eau et de l'air - Flexible et facile à installer	- Peut se dégrader avec le temps - Certaines racines peuvent pénétrer
Barrières en béton	Structures solides placées sous terre	- Béton coulé sur place - Blocs préfabriqués en béton	- Durable et longue durée de vie - Fournit une protection solide	- Installation difficile et coûteuse - Flexibilité limitée
Feuilles métalliques	Feuilles ou panneaux métalliques pour empêcher la croissance	- Panneaux en acier - Feuilles en aluminium	- Très durables et solides - Bonne protection contre l'intrusion	- Coûteux - Flexibilité limitée, risque de corrosion
Barrières chimiques	Traitements appliqués au sol ou aux racines pour inhiber	- Herbicides - Inhibiteurs de croissance	- Efficace pour contrôler les racines - Applicable à différentes profondeurs	- Risque de nuire à l'arbre - Nécessite une ré application périodique

3.2.4 Propositions pour de nouveaux designs de plantation

Dans cette section nous présentons quatre stratégies de nouveaux designs de plantation pouvant limiter ou nuire au conflit entre les arbres et les réseaux souterrains.

3.2.4.1 Séparation des arbres et des réseaux le long d'un axe vertical

En raison de la présence de la plupart des racines d'arbres dans le premier mètre du sol, une solution proposée consiste à séparer les arbres et les réseaux le long d'un axe vertical, en faisant passer les câbles et les tuyaux directement sous les arbres. Une étude a révélé que lors de travaux de tranchées occasionnels en ville, relativement peu de contacts racine/tuyau (et principalement insignifiants) se produisaient lorsque les arbres étaient situés au-dessus de la canalisation (Mattheck & Bethge, 1999). C'était particulièrement vrai lorsque les vents soufflaient principalement dans la direction transversale, un phénomène probablement expliqué par l'effet d'abri des arbres alignés qui peut réduire la charge sur chaque individu (Mattheck & Bethge, 1999). La ville de Toronto propose un "zonage vertical" comme moyen viable de limiter les conflits entre les arbres et les réseaux souterrains (Fig. 18), en proposant les recommandations clés suivantes (Nicklin et al., 2013) :

- Les réseaux devraient être autorisés à passer à travers les zones de racines et de sol des arbres.
- Les marges de recul existantes pour la motte racinaire devraient être maintenues.
- De nouveaux détails standard pour les arbres des rues sont proposés pour permettre une maintenance et une réparation faciles des réseaux.
- De nouveaux détails standard pour les arbres des rues sont proposés pour accommoder divers scénarios de réseaux.

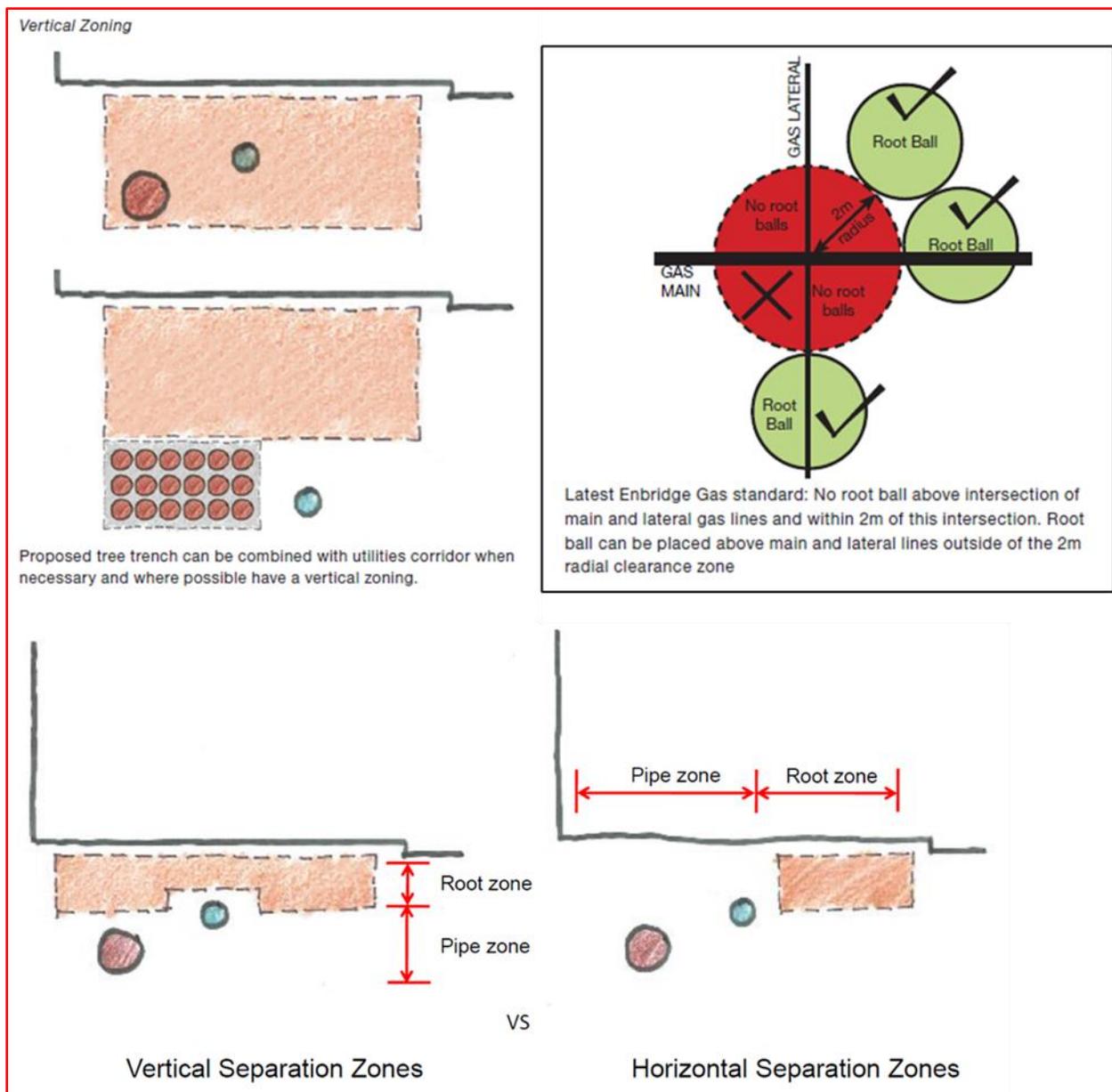


Figure 18 : Proposition d'une séparation verticale entre la zone racinaire et la zone des réseaux (Nicklin et al., 2013).

Cette proposition découle de la nécessité d'obtenir des volumes de sol appropriés est rarement possible en utilisant une séparation horizontale dans des zones urbaines particulièrement denses (Nicklin et al., 2013). Une attention particulière devra être accordée lors de l'exécution de travaux de réparation et de maintenance afin d'éviter d'endommager l'arbre (des technologies sans tranchée peuvent être utilisées dans de nombreux cas). Les coûts supplémentaires peuvent être davantage limités en plaçant les réseaux à un angle par rapport à l'arbre, c'est-à-dire une installation en dessous de l'arbre selon un point de vue vertical, mais avec une certaine séparation horizontale également pour qu'ils ne soient pas directement en dessous, mais tout de même à une distance plus proche que celle recommandée. Cela peut être utilisé avec ou sans l'utilisation de sols structuraux en combinaison (Nicklin et al., 2013).

Cependant, en raison du manque de recherche, les profondeurs d'installation exactes requises pour limiter ou éviter complètement les interactions entre les arbres et les réseaux souterrains restent inconnues. De plus, l'importance de différents facteurs tels que le vent, le type de sol, l'espèce, la taille/âge de l'arbre, etc. est également un mystère. Plus de recherches pratiques seraient nécessaires pour tester l'efficacité et la faisabilité de cette solution à court et à long terme.

3.4.1.2 Séparation des arbres et des réseaux le long d'un axe horizontal

La séparation le long d'un axe horizontal est une méthode plus traditionnelle que la séparation verticale. La division horizontale de l'espace en un « corridor utilitaire » et un « corridor arboré » peut être utile pour limiter les conflits, pour autant que l'espace le permette (Jim, 1998a; Fig. 19). En prévision de cet espace réduit imposé par la séparation horizontale, des bacs à arbres sur les trottoirs peuvent être utilisés en combinaison avec des sols structuraux pour augmenter le volume total de sol disponible pour les arbres (Frédette & Trickey-Massé, 2023). De plus, pour limiter les conflits avec les réseaux souterrains, des barrières racinaires peuvent être utilisées pour diriger la croissance loin des réseaux (Morgenroth, 2008 ; Nicklin et al., 2013). Par conséquent, il est important de se rappeler qu'il n'existe pas de solution unique qui fonctionnera le mieux, mais souvent une combinaison de plusieurs solutions donnera les meilleurs résultats. Encore une fois, toutes ces solutions proposées n'ont pas été testées pratiquement sur le terrain.

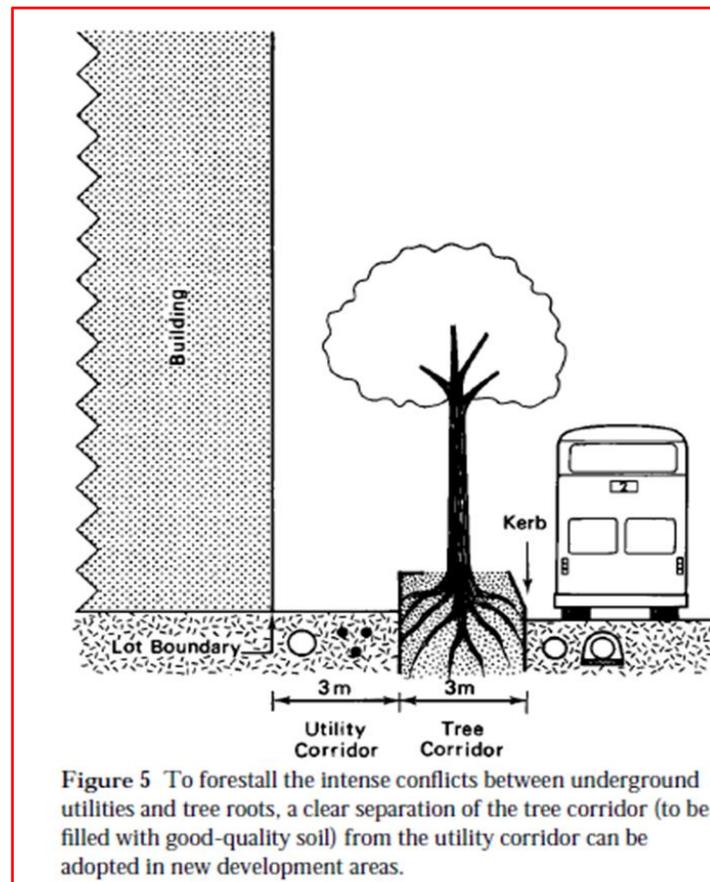


Figure 19 : La division horizontale de l'espace en un « corridor utilitaire » et un « corridor arboré » (Jim, 1998a; Fig. 5).

Lors de l'examen des différents modèles de plantation pour la séparation horizontale des arbres et des réseaux souterrains, nous pouvons à nouveau nous référer au manuel de solutions de plantation d'arbres développé par la ville de Toronto (Nicklin et al., 2013). Ils recommandent quatre types de modèles de base (Tableau 8).

Tableau 8. Type de conception pour des séparations racinaires/réseaux au long d'un axe horizontal selon Nicklin et al., (2013)

Type de conception	Description	Accès aux services	Services recommandés	Avantages et inconvénients
Systèmes de pont de chaussée	Chaussée structurale sur une tranchée, accès par forage ou retrait de dalle.	Excavation du sol de plantation ou granulaire.	Recommandé : Canalisations d'égout/béton, Conduits hydrauliques en béton, Énergie de quartier. Non recommandé : Conduite d'eau sous pression, Gaz, Conduits nus.	Coût-efficace, mais accès limité. Options de réparation restreintes.
Panneau en béton préfabriqué « pont »	Panneaux préfabriqués sous pavage unitaire, permettant le levage pour accès.	Excavation du sol de plantation / granulaire.	Recommandé : Canalisations d'égout, Conduits hydrauliques en béton, Énergie de quartier, Conduite d'eau, Gaz, Conduits nus.	Démontage, réparation et remplacement efficaces mais nécessite deux systèmes de chaussée.
Système de cellules de sol	Cellules de sol rigides supportant la chaussée au-dessus du milieu de croissance.	Excavation des cellules de sol.	Compatible avec divers services sous la zone racinaire, p. ex., canalisations d'égout, conduites d'eau, gaz, etc.	Accès et réparation efficaces, mais peut nécessiter le remplacement des cellules de sol.
Système de jardinière ouverte	Pas de pavage autour de la base de l'arbre, rentable pour la croissance des arbres urbains.	Excavation du sol non compacté.	Compatible avec les services sous la zone racinaire.	Simple et rentable, convient aux trottoirs avec une largeur suffisante.

Des exemples des types au Tableau 8, sont tirés du manuel et fournis par les Fig. 20, 21 et 22. Le manuel « *Tree Planting Solutions in Hard Boulevard Surfaces: Best Practice Manual* » peut être consulté pour des descriptions plus détaillées, ainsi que des recommandations sur la manière dont les opérations de maintenance/intervention pourraient être effectuées (Nicklin et al., 2013).

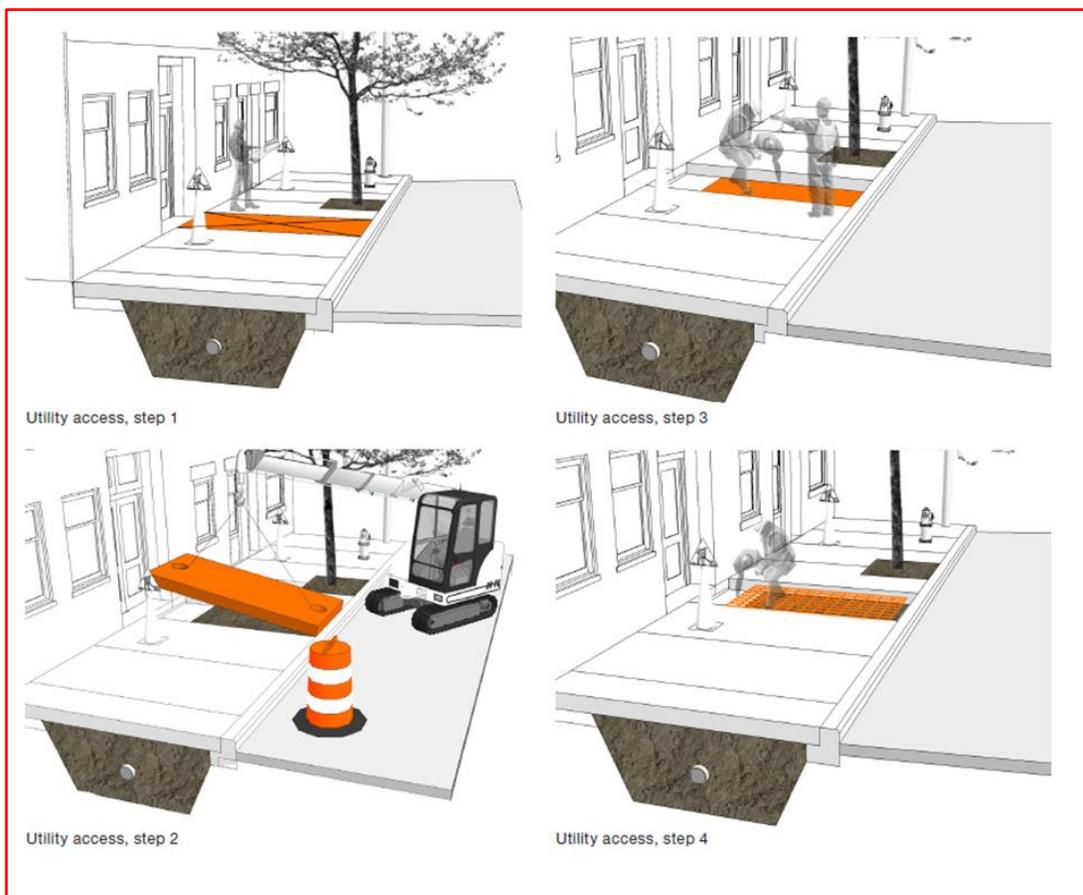


Figure 20 : Illustration du « Systèmes de pont de chaussée » (Nicklin et al., 2013).

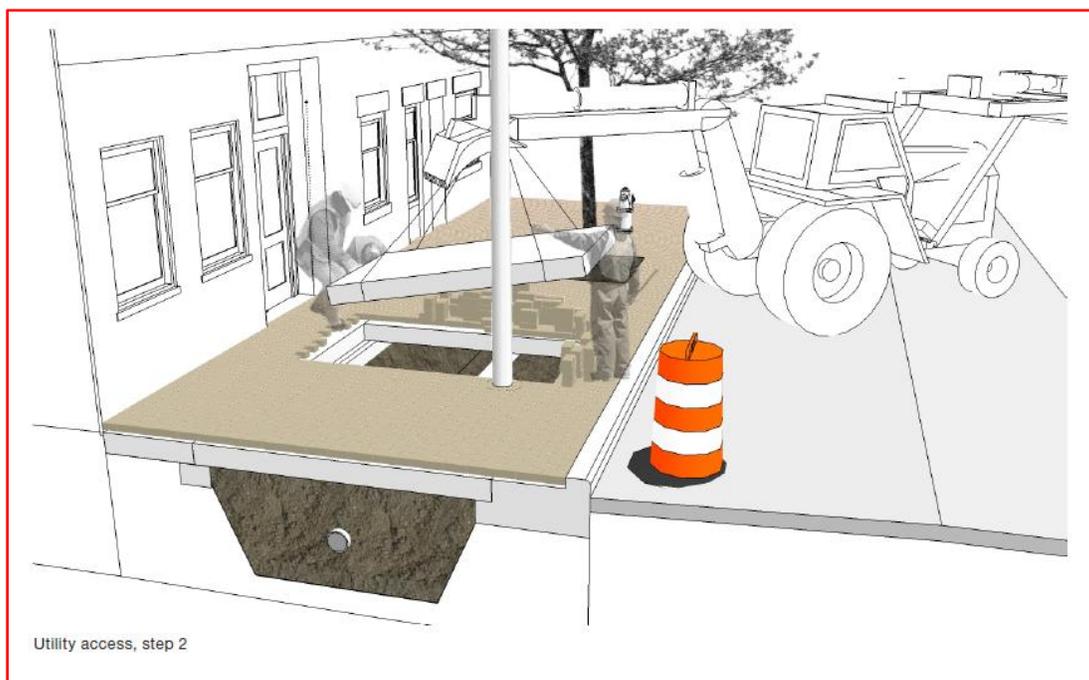


Figure 21 : Illustration du « Panneau en béton préfabriqué 'pont' » (Nicklin et al., 2013).

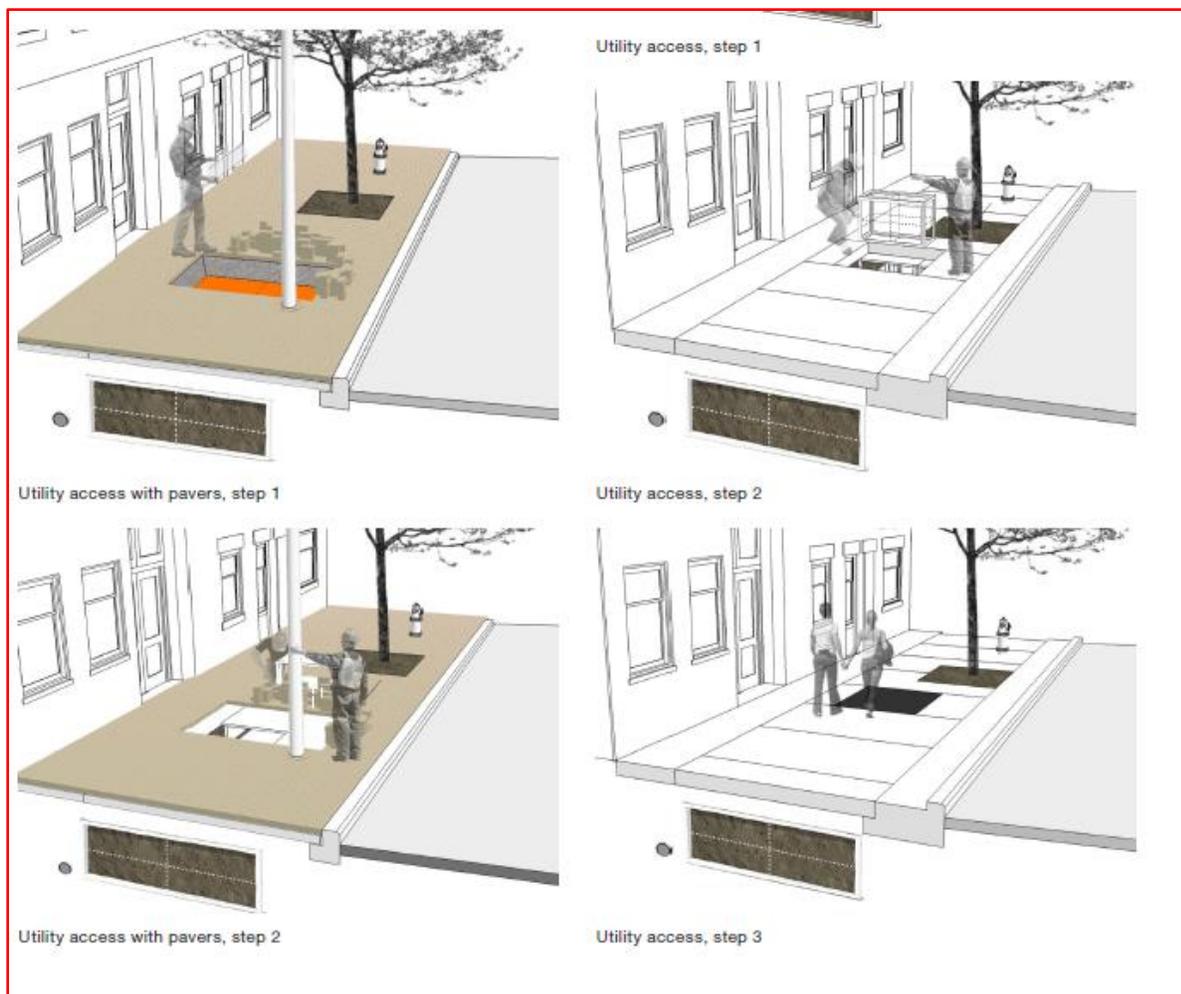


Figure 22 : Illustration du « Système de cellules de sol » (Nicklin et al., 2013).

3.2.4.3 Utilisation des arbres en pots et des sols structuraux

Bien que les bacs à plantes pour les arbres soient proposés comme une solution possible pour limiter les conflits entre les racines des arbres et les réseaux souterrains, très peu de recherches et d'informations sont disponibles à leur sujet. En fait, une étude en cours avec l'UQAM et le Partenariat du Quartier des Spectacles vise à évaluer la faisabilité de l'utilisation de bacs à plantes pour les arbres dans les espaces urbains et leur impact potentiel sur la santé et la croissance des arbres. En général, les bacs à plantes sont considérés comme des environnements difficiles, et différents types de bacs à plantes présenteront différents problèmes associés (Fleckenstein et al., 2022 ; Kelsey, 1993). Dans tous les cas, un inconvénient majeur est le potentiel racinaire limité (Fleckenstein et al., 2022 ; Kelsey, 1993). Cet inconvénient peut être compensé en garantissant des conditions de croissance optimales dans le sol, en termes d'eau, de nutriments, de salinité et d'alcalinité, qui peuvent tous être contrôlés dans une certaine mesure (Kelsey, 1993). De plus, une étude sur un projet de bacs à plantes existant a révélé que certains designs et approches existants semblent prometteurs, et qu'intégrer un aspect temporel aux conceptions de plantation (Fig. 23) pourrait aider à accroître le succès (Fleckenstein et al., 2022). Cependant, l'utilisation d'arbres dans des bacs à plantes pour aider à

résoudre le problème d'espace dans les environnements urbains reste largement inexploité dans la recherche (Fleckenstein et al., 2022).

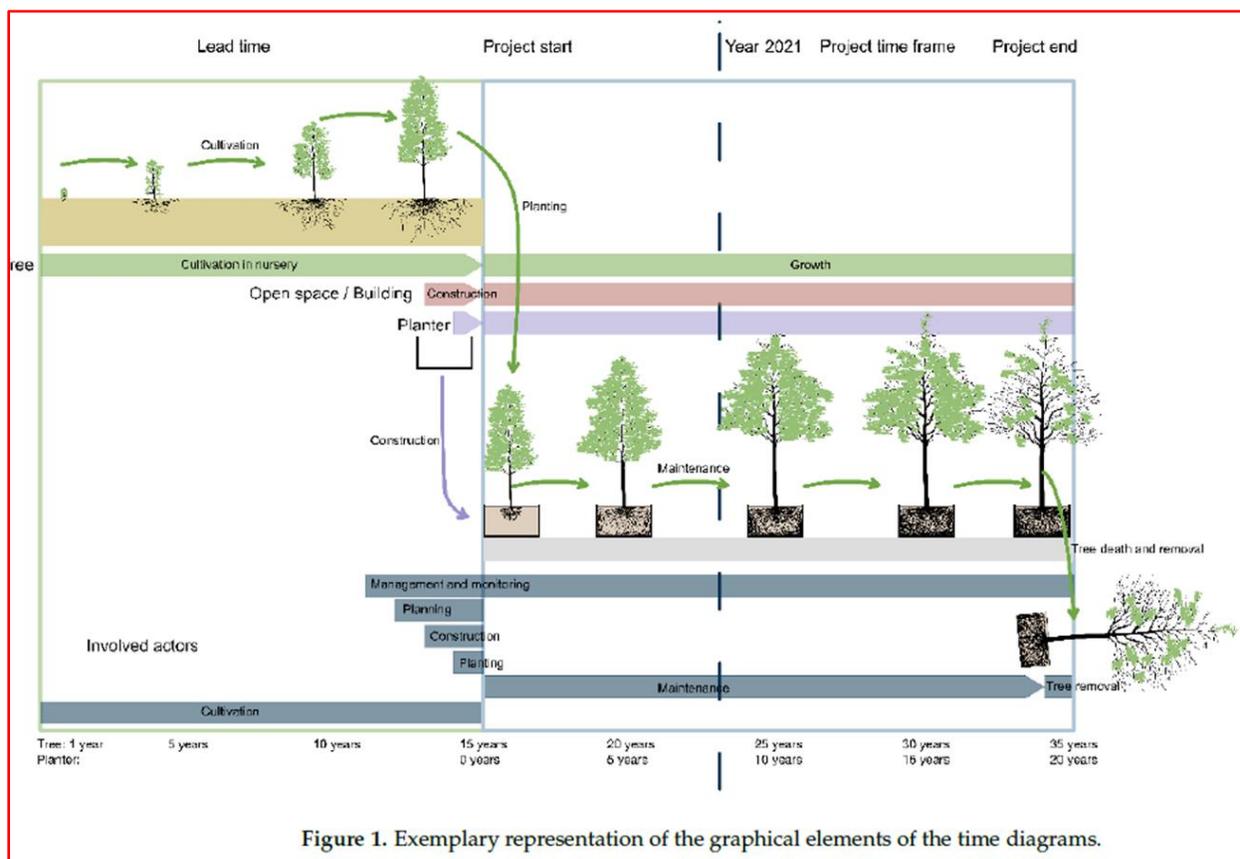


Figure 1. Exemplary representation of the graphical elements of the time diagrams.

Figure 23 : Représentation exemplaire des éléments graphiques des diagrammes temporels pour des projets avec arbres en pot (Fleckenstein et al., 2022).

Les sols structuraux représentent une autre solution proposée pour aider à délimiter les arbres des réseaux souterrains, alors que peu de recherches aient été menées sur le sujet (Shi et al., 2023) qui ne sera pas discuté en détail. Des sols structuraux tels que CuSoil, le mélange DMG, le Carolina Stalite et le sol pour arbres d'Amsterdam ont été proposés comme solutions pour aider à la croissance des racines (Costello & Jones, 2003 ; Roberts et al., 2006) ; le plus couramment utilisé étant le sol pour arbres d'Amsterdam (Shi et al., 2023). Le sol pour arbres d'Amsterdam est principalement composé de sable, avec une certaine quantité d'argile et de matière organique. Sa composante mixte permet aux arbres d'optimiser une zone plus étendue de sol autrement compacté en enrichissant l'environnement de manière favorable à la croissance. La plupart des sols structuraux sont principalement composés de pierres concassées pour former une matrice supportante, ce qui leur permet d'être utilisés comme sous-couche pour des zones à circulation piétonne ou légèrement véhiculaire (comme sous les trottoirs).

Leur utilisation, dans des espaces confinés, pour améliorer la séparation entre les arbres et les réseaux, tout en favorisant la croissance, a été proposée par plusieurs sources (Costello & Jones, 2003 ; Frédette & Trickey-Massé, 2023. ; Mullaney et al., 2015 ; Shi et al., 2023 ; Watson et al., 2014). Ils ont été trouvés pour encourager une croissance racinaire plus profonde, certaines études ayant trouvé des racines plus longues dans les sols structuraux que dans les sols

urbains (Mullaney et al., 2015). Un autre avantage est que les sols structuraux conservent leur structure sans se tasser après l'installation (Schollen & Company Inc. et al., 2017 ; Watson et al., 2014).

Cependant, de bons résultats avec ces sols nécessitent une attention particulière au type de sol, à la profondeur et au volume, au drainage et à l'infiltration de l'eau, au pH, à la nutrition et enfin à l'espace de plantation (Costello & Jones, 2003). En tant que guide général des coûts, les arbres nécessitent généralement 0,06 mètre cube de sol structural par 0,09 mètre carré, pour un coût de 39 à 43 \$ par mètre cube pour le Cu-Soil (Costello & Jones, 2003).

3.2.4.4 Modèle Deep City (Parriaux et al., 2007)

Le modèle Deep City a été étudié dans certaines grandes villes telles que Paris et Mexico en tant que nouveau concept méthodologique visant à équilibrer l'aménagement du territoire avec l'équilibre environnemental en exploitant l'axe descendant des villes. Le projet est théorique et vise à rendre les environnements urbains plus compatibles avec le développement durable. Il promeut le passage d'une "approche sectorielle" à la gestion (Fig. 24), où de multiples interventions répétées sont effectuées par différents secteurs à différents moments dans un espace partagé, à une approche regroupant les ressources en quatre catégories :

- Ressources dans l'espace (lieu pour la construction de bâtiments et d'infrastructures)
- Ressources dans les géomatériaux (principalement issues d'excavations souterraines)
- Ressources en eau souterraine, pour la consommation ou les besoins industriels (aquifères à différentes profondeurs)
- Ressources en géothermie (systèmes géothermiques peu profonds et profonds)

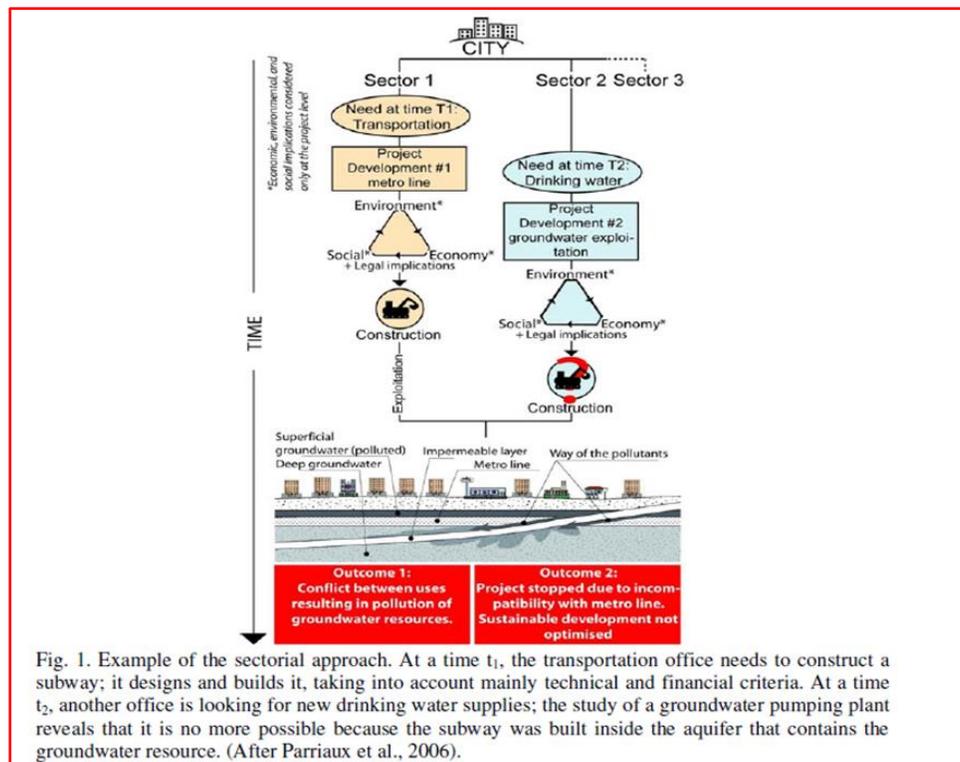


Figure 24 : Représentation de l'approche sectorielle du Deep City Model (Parriaux et al., 2007).

L'approche Deep City privilégie l'utilisation de la planification en 3D pour atteindre les objectifs de durabilité tout en tenant compte de la faisabilité économique et de l'acceptabilité humaine. Elle vise à apporter des solutions durables pour l'utilisation du sous-sol, minimisant les conflits à long terme et évitant de compromettre les ressources sous la ville, en tenant compte du long terme. Les facteurs suivants ont été identifiés comme contribuant à « l'approche sectorielle » et des méthodes pour changer les mentalités et les réalités qui les sous-tendent devront être élaborées :

- Construire rapidement à faible coût ;
- Absence de planification à long terme ;
- Manque de connaissance du sous-sol ;
- Peu de contacts entre les secteurs ;
- Absence de compréhension des autres domaines.

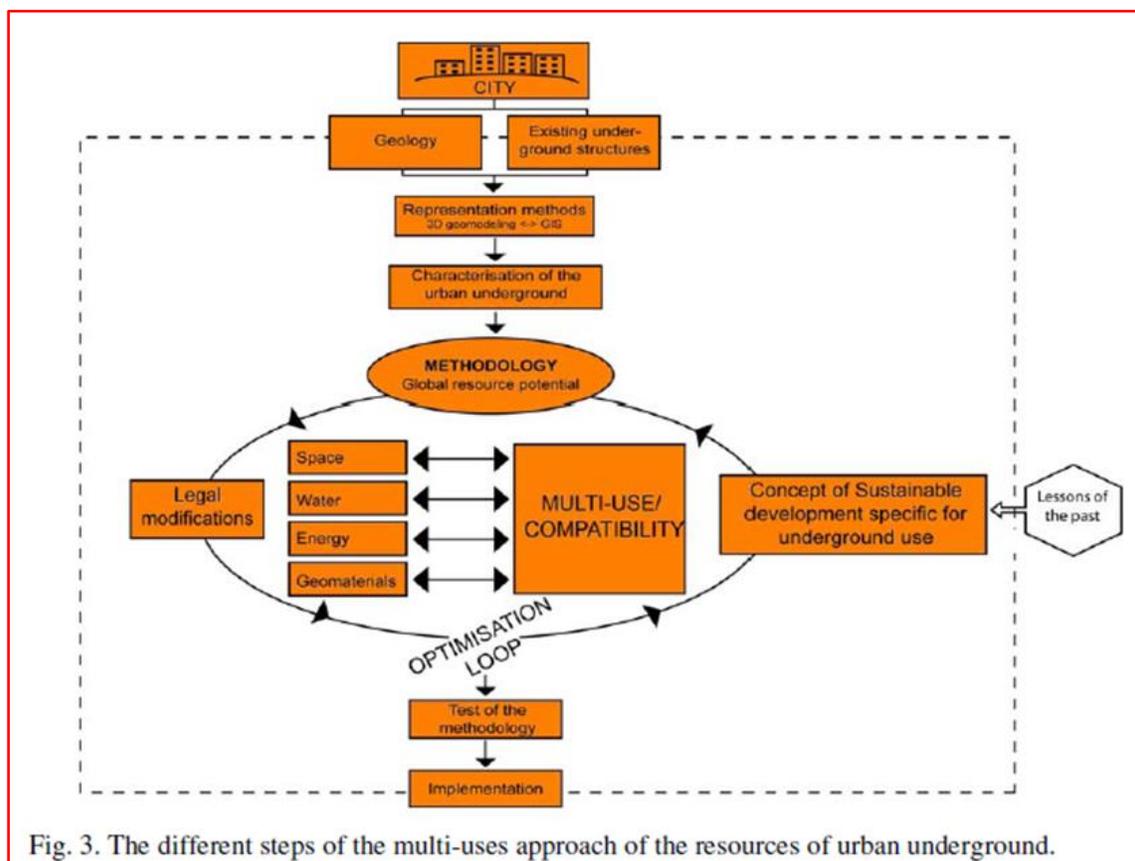


Figure 25 : Les différentes étapes de l'approche multi-usage des ressources du souterrain urbain (Parriaux et al., 2007)

Enfin, il propose un modèle polyvalent de planification réalisé au niveau communautaire plutôt que dans des sections isolées (Fig. 25). Plus précisément, il propose le processus en cinq étapes suivantes :

1. Élaborer un modèle géologique en 3D de la ville : un modèle géologique en 3D intègre des cartes, des données de forage et des informations souterraines pour définir l'espace souterrain de la ville, améliorant la précision grâce à une collecte systématique des

profils de forage, essentielle pour l'évaluation des ressources et la prévention des incidents.

2. Présentation des structures d'ingénierie : le modèle géologique est amélioré en intégrant l'état actuel de l'environnement bâti souterrain, en se concentrant sur l'enregistrement de l'occupation humaine.
3. Étude du concept de gestion multi-usage des ressources : définir le potentiel du sous-sol urbain pour le développement durable des ressources implique d'envisager divers scénarios de développement de la ville et de mettre en œuvre des concepts multi-usages comme ceux du projet Deep City, en réservant des formations géologiques à des fins spécifiques tout en restreignant les utilisations combinées dans d'autres en fonction de réglementations strictes.
4. Intégration dans la procédure de planification foncière à long terme : les affectations des espaces souterrains doivent s'intégrer dans la planification foncière en 3D, alignant les activités de surface avec les fonctions souterraines, nécessitant des ajustements des réglementations de planification foncière pour le développement des infrastructures souterraines communautaires.
5. Adaptation des structures existantes au nouveau concept de planification foncière : le concept de planification foncière établit non seulement des limites pour de nouvelles structures, mais identifie également et élimine les constructions incompatibles, sécurisant l'espace et adaptant progressivement d'autres structures conformément aux politiques à long terme face aux changements urbains.

3.3_ Recommandations pratiques pour limiter les conflits avec le système d'égouts

Le conflit entre les racines et les systèmes d'égouts urbains est un problème qui se produit fréquemment à l'échelle mondiale. La plupart des travaux sur lesquels reposent les solutions et recommandations suivantes proviennent d'études internationales, notamment d'Europe et d'Australie, mais de nombreuses conclusions sont transférables à un contexte nord-américain. Globalement, deux thèmes principaux peuvent être mis en œuvre pour limiter les interactions négatives : les stratégies réactives et les stratégies proactives, ainsi que la sélection des espèces, la distance de plantation et les caractéristiques des conduites. Il a également été noté que la plupart des informations actuelles concernant la coordination de la plantation des arbres et des réseaux souterrains proviennent des normes de l'industrie plutôt que de recherches ciblées (Slater & Chalmers, 2022) ; quelque chose qui pourrait devoir changer à l'avenir si nous espérons permettre aux arbres de coexister avec les réseaux souterrains alors que l'espace urbain devient de plus en plus limité.

3.3.1 Stratégies réactives

En raison des contraintes budgétaires et de l'ampleur même du système d'égouts urbain, la plupart des villes adoptent des stratégies réactives plutôt que proactives (Desilva et al., 2011). Cela peut rendre difficile la prévention du problème, en particulier dans les systèmes plus anciens qui sont constitués de matériaux plus sujets à la fissuration et à l'intrusion subséquente des racines (Randrup et al., 2001). Les stratégies réactives supposent que l'intervention n'a lieu

qu'une fois qu'un problème est détecté et ne constituent généralement que des solutions temporaires, car elles ne traitent pas la cause profonde du problème (Chapman, 1982).

La mitigation et/ou l'élimination des racines dans les conduites d'égouts peuvent être réalisées en utilisant des méthodes de contrôle mécanique ou chimique, ou idéalement une combinaison des deux. Des méthodes de contrôle physique peuvent également être adoptées dans les cas extrêmes, mais elles sont souvent les plus coûteuses (Obradović, 2017). La liste complète des méthodes de contrôle est expliquée dans le Tableau 9. Les méthodes de contrôle mécanique sont les plus utilisées (Obradović, 2017), mais les méthodes de contrôle chimique sont également courantes (Östberg et al., 2012). Une étude a montré qu'une inhibition significative était obtenue en utilisant les traitements chimiques suivants : dichlobénile (278 g/m³ et 1392 g/m³), sulfate de cuivre (1,5 g de Cu/kg de sol et 7,5 g de Cu/kg de sol), oryzaline (1031 g/m³) et trifluraline (260 g/m³) (Pohls et al., 2004). Toutefois, pour les contrôles chimiques, c'est une combinaison de métam-sodium et de dichlobénile appliquée en petites doses sous forme de mousse air-eau qui est le plus souvent adoptée. (Watson et al., 2014). Cependant, les stratégies les plus efficaces et durables utilisent des mesures de contrôle mécanique pour éliminer la masse racinaire en conjonction avec des mesures de contrôle chimique pour limiter, réduire ou retarder la réinvasion des racines (Desilva et al., 2011; Obradović, 2017).

Une étude menée par Desilva et al. (2011) a également examiné le pourcentage d'utilisation de chaque stratégie considérée comme efficace par les répondants à une enquête en Australie ; en plus d'une comparaison entre les ratios de dépenses proactives et réactives pour quatre entreprises (Fig. 26).

Tableau 9. Méthodes de contrôle racinaire dans les conduits d'égouts

Type	Description	Source
Physique	Abattage d'arbres	(Obradović, 2017)
Physique	Remplacement ou revêtement des conduites	(Obradović, 2017)
Mécanique	Foreuses ou machines à tiges : coupe des racines	(Desilva et al., 2011; Obradović, 2017)
Mécanique	Jets haute pression : rinçage à haute pression	(Desilva et al., 2011; Obradović, 2017; Stål, 1998)
Chimique	Herbicides (peuvent être dangereux)	(Obradović, 2017; Östberg et al., 2012)
Chimique	Inhibiteurs de racines (souvent sous forme de mousse)	(Obradović, 2017; Östberg et al., 2012)

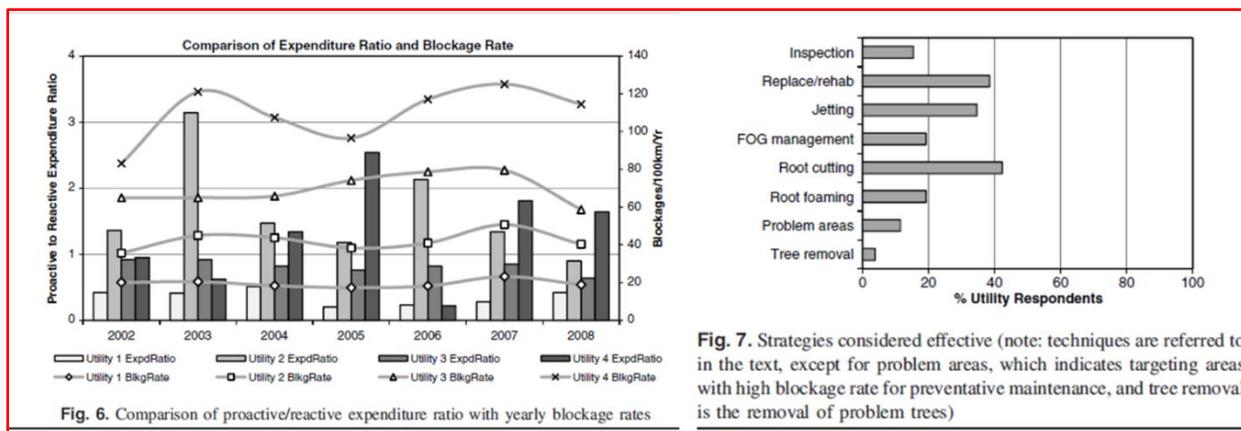


Figure 26 : Comparaison des dépenses de stratégies proactives/réactives avec taux annuel de blocage (gauche) et stratégies considérées comme étant efficaces par répondant d'une enquête (droite). Prise de Desilva et al. (2011).

3.3.2 Stratégies proactives

Idéalement, les villes devraient adopter des stratégies proactives. Celles-ci peuvent concerner l'un des deux contextes : une planification appropriée lors de la conception et de l'installation de nouveaux réseaux d'égouts, et/ou la surveillance et les inspections régulières des réseaux d'égouts existants. Il a longtemps été mentionné dans la littérature que le seul moyen réel de résoudre le conflit entre les racines et les égouts soit de prévenir, ou de retarder autant que possible, la pénétration initiale (Chapman, 1982 ; Randrup et al., 2001). Lors de l'établissement d'un nouveau site, une évaluation des risques devrait être réalisée, comprenant (Ridgers et al., 2006) :

- Les espèces d'arbres présentes sur le site
- Le type de site de plantation créé pour l'arbre
- La distance entre l'arbre et la conduite
- Les types de mesures préventives prises pour éviter l'intrusion des racines
- Le choix du type de tuyau, du matériau du tuyau et de la méthode d'installation

La connaissance de ces éléments permettra de mieux prévoir le niveau de risque d'une installation particulière. Par exemple, des conditions de croissance plus idéales réduiront le gradient d'eau incitant les racines à rechercher les tuyaux (Ridgers et al., 2006). Il est également plus probable que les espèces à croissance plus lente conviennent mieux à la plantation à proximité des égouts en raison de leur système racinaire moins agressif (Watson et al., 2014), bien que cela n'ait pas été testé.

L'inspection régulière est également une façon proactive de surveiller le réseau de canalisations existant et d'identifier les problèmes potentiels avant qu'ils ne surviennent (Siu et al., 2022). Cela peut entraîner des coûts élevés, mais différentes méthodes peuvent être utilisées pour atténuer ces dépenses en fonction du contexte (Tableau 10).

Nous pouvons également considérer certaines mesures de contrôle proactives comme moyen de limiter les intrusions dès le départ (Obradović, 2017). Celles-ci peuvent inclure :

- Inspection minutieuse des joints et des joints d'étanchéité pour détecter les imperfections lors de l'installation (Obradović, 2017 ; Randrup et al., 2001 ; Stål, 1998)
- Contrôle des espèces sélectionnées (Obradović, 2017)
- Respecter une distance de plantation minimale par rapport au tuyau (Obradović, 2017)
- Concevoir des systèmes qui dureront 40 ans ou plus sans intervention (Prax & Ěrmák, 2004)
- S'assurer que les joints sont serrés à 30Kpa pour les tuyaux en béton et à 50Kpa pour les tuyaux en PVC (Randrup et al., 2001)
- Éviter l'utilisation de tuyaux en argile ou en brique dans de nouvelles installations et privilégier des matériaux qui ne se fissureront pas ou ne se casseront pas lors de l'installation (Randrup et al., 2001)
- Améliorer les politiques existantes (Desilva et al., 2011)
- Réduire le nombre de joints de tuyaux en augmentant la longueur des tuyaux (Stål, 1998)

Cependant, pour pouvoir planifier avec précision la coexistence des arbres et des égouts, il est important de tenir compte des conditions de croissance du site, de comprendre les points vulnérables du système, de connaître les capacités de pénétration et les distances de croissance des différentes espèces, ainsi que la profondeur optimale des tuyaux - des informations non toujours disponibles ou connues (Ridgers et al., 2006). En raison de ce manque d'informations, les stratégies actuelles reposent largement sur l'augmentation de la séparation ou l'amélioration de la construction plutôt que sur l'approfondissement de notre compréhension pour promouvoir la cohabitation (Watson et al., 2014). La communication, entre ceux qui plantent des arbres et ceux qui installent et entretiennent les réseaux d'assainissement, augmente également les chances de coexistence réussie (Ridgers et al., 2006).

Tableau 10. Méthodes proactives d'inspection et de surveillance des égouts

Type	Commentaires
CCTV	<ul style="list-style-type: none"> • régulièrement utilisé, mais peut être coûteux (Siu et al., 2022) • inspections régulières pour déterminer les zones qui pourraient bénéficier de suppressions ciblées des racines lorsque le problème est faible (Desilva et al., 2011) • bon outil de départ, pouvant alimenter des modèles géoréférencés (Torres et al., 2017) • méthode la plus courante (Mohammadi et al., 2020) • peut être utilisé dans des études pour identifier les espèces posant problème (Östberg et al., 2012)
Modèle d'apprentissage automatique (IA)	<ul style="list-style-type: none"> • nécessitent de grandes quantités de données, l'utilisation de modèles de conduites en 3D peut aider à limiter les coûts et à fournir des informations aux modèles (Siu et al., 2022) • peuvent utiliser des ensembles de données existants sur l'inspection des conduites pour prévoir l'état des conduites dans les zones encore non inspectées ; l'âge, le matériau, le diamètre, le débit, la longueur de segment de conduite sont tous pris en compte, ainsi que la profondeur, la pente, le type de sol, le pH, la teneur en sulfate, la nappe phréatique, le groupe hydraulique du sol et la corrosivité du sol ; 87 % de précision, utilisé pour budgétiser de manière rentable (Mohammadi et al., 2020)
Modèle géoréférencé	<ul style="list-style-type: none"> • En utilisant des inventaires d'arbres et des données vidéo de CCTV, les caractéristiques des conduites et les espèces d'arbres les plus responsables des dommages/intrusions peuvent être identifiées et extrapolées pour prédire/identifier de nouvelles zones problématiques ; une utilisation plus efficace des coûts ne nécessitant pas des investigations spécifiques au site mais plutôt sur l'ensemble du système (Torres et al., 2017)

3.3.3 Espèces et Distance

Plusieurs études ont été menées pour examiner quelles espèces sont les plus susceptibles de causer des obstructions. Une étude en Australie a intégré des données sur les tuyaux d'égout, les arbres et l'environnement provenant de 103 quartiers de Sydney pour déterminer les espèces et les facteurs les plus importants provoquant des obstructions des égouts (Ossola et al., 2023). Étonnamment, la morphologie urbaine et les caractéristiques des tuyaux étaient plus importantes que les caractéristiques des arbres pour expliquer les obstructions (Ossola et al., 2023; Fig. 27), ce qui indique qu'il est également important de tenir compte d'autres éléments que les espèces et la distance.

Cependant, les espèces jouent un rôle, tout comme la densité (nombre de tiges) dans la prédiction des risques d'obstruction (Desilva et al., 2011). Dans une étude menée au Danemark, le saule (*Salix* spp.), le bouleau (*Betula* spp.), les peupliers (*Populus* spp.) et l'orme (*Ulmus* spp.) ont été mentionnés comme les espèces causant les plus grands problèmes d'intrusion des racines (30 %, 25 %, 23 % et 6 %, respectivement ; Randrup, 2000). En Suède, il a été déterminé que les espèces à feuilles larges (principalement les espèces de *Malus* et de *Populus*) étaient les plus responsables de l'intrusion, bien que des conifères et des arbustes des genres *Ligustrum*, *Spiraea* et *Syringa* aient également probablement causé des intrusions de racines dans certains cas (Östberg et al., 2012). Shi et al. (2023) ont également identifié une liste d'espèces problématiques, bien que certaines soient liées à l'environnement urbain général et non spécifiquement au système d'égouts (Tableau 6).

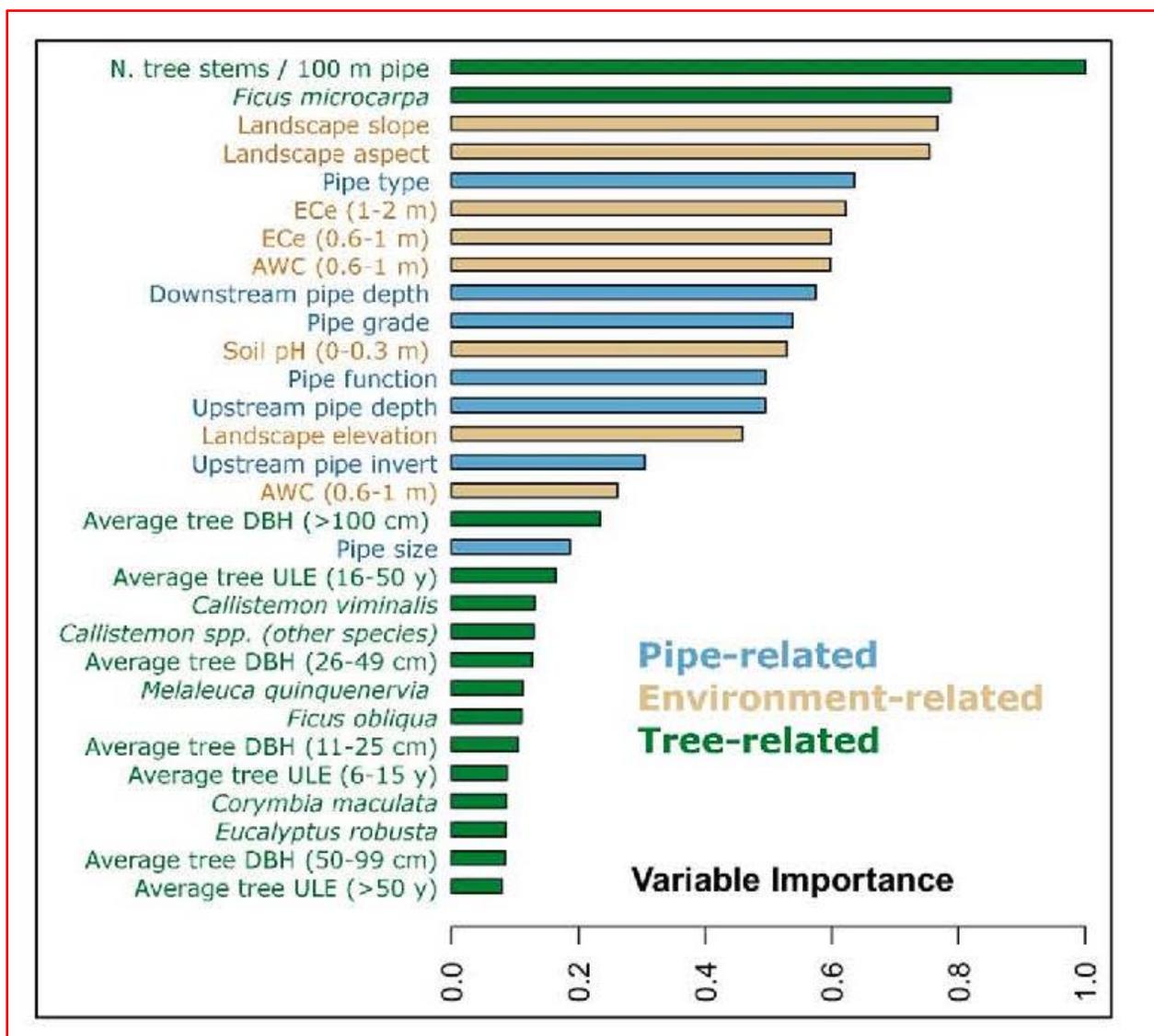


Figure 27 : Espèces et facteurs les plus importants provoquant des obstructions des égouts à Sydney, Australie. En bleu, les facteurs liés aux tuyaux ; en jaune, les facteurs environnementaux ; et en vert, les facteurs liés à l'arbre. (Ossola et al., 2023).

La relation entre les espèces et la distance de plantation d'arbre et/ou d'installation de conduit serait une information encore plus précieuse, mais peu de travaux ont été effectués sur le sujet. Seule une étude en Australie a été trouvée (Harris et al., 1999) rapportant une liste de 100 espèces d'arbres et d'arbustes qui ne peuvent pas être plantées à moins de 2 mètres d'un égout principal de rue. Une liste supplémentaire comprend 95 espèces ne pouvant pas être situées à moins de 3,5 mètres d'un égout principal et 30 espèces qui ne devraient jamais être plantées dans une rue avec zone de drainage (Harris et al., 1999).

En ce qui concerne les distances uniquement, la plupart des études recommandent qu'aucune espèce ne soit plantée à moins de 6 mètres (Pohls et al., 2004 ; Slater & Chalmers, 2022 ; Watson et al., 2014). Ceci est basé sur une étude qui a constaté que 48 % de toutes les intrusions dans les systèmes d'égouts danois se produisent à moins de 3 mètres, et 44 % supplémentaires entre

3 et 6 mètres (Randrup et al., 2001). En République tchèque, la réglementation stipule que la distance minimale sécuritaire de plantation pour les égouts et les arbres est seulement de 2,5 mètres (Prax & Ermák, 2004).

3.3.4 Attributs des conduites

Comprendre les attributs des conduites les plus vulnérables à l'intrusion des racines peut également aider à orienter les meilleures pratiques. Ci-dessous se trouve un tableau récapitulatif issu de la littérature des caractéristiques les plus susceptibles d'avoir des intrusions et des proliférations de racines, causant des obstructions (Tableau 11). Il pourrait être possible d'adapter les conceptions de construction pour limiter les interactions en se basant sur ces informations.

Tableau 11. Caractéristiques les plus susceptibles d'avoir des intrusions et des proliférations de racines, entraînant des obstructions

Caractéristiques	Description/Commentaires
Diamètre du tuyau	<ul style="list-style-type: none"> • Moins de 300 mm (Desilva et al., 2011) • Entre 150 et 250 mm (Marlow et al., 2011) • 150 mm (Pohls et al., 2004)
Matériau du tuyau	<ul style="list-style-type: none"> • Argile et béton (Marlow et al., 2011) • Argile et brique (Torres et al., 2017) • Argile (T. B. Randrup et al., 2001) • Argile (85,5 %), Béton (11,3 %), PVC (2,9 %) (Pohls et al., 2004)
Type de joint	<ul style="list-style-type: none"> • Âgés, sans joints en caoutchouc (Pohls et al., 2004 ; Randrup, 2000 ; Randrup et al., 2001)
Taille du tuyau	Petite (Marlow et al., 2011)

Marlow et al. (2011) ont également examiné l'âge des tuyaux entre deux entreprises. La première a observé trois pics d'intrusion de racines, le premier entre 40 et 60 ans, le deuxième à 80 ans et le troisième à 120 ans, comparés au premier à 40-60 ans et au deuxième à 90 ans pour la deuxième entreprise (Marlow et al., 2011). Plus de données seraient nécessaires pour déduire un schéma généralisé, mais cela pourrait aider à déterminer quand des interventions seraient nécessaires. Une autre étude exhaustive en Australie a révélé que les tuyaux de 150 mm ou moins posés à moins de 1 m de la surface représentaient 88,5 % de tous les conflits liés aux arbres et représentaient 42 % de l'ensemble des tuyaux du réseau (Pohls et al., 2004). Le pic de blocage a également été constaté entre 30 et 59 ans après l'installation (Pohls et al., 2004).

3.4 Recommandations pratiques pour limiter les conflits avec le réseau de gaz naturel

Le principal problème entre les arbres et le réseau de gaz naturel est le potentiel des racines de pénétrer le revêtement extérieur protecteur des tuyaux et, dans des circonstances plus rares, de causer des dommages mécaniques. Une étude de cas menée par la Pacific Gas and Electric Company (PG&E) a examiné comment les racines interagissaient avec les conduits de gaz (Barnes & Ingemansson, 2015 ; Fig. 28). L'interaction avec le tuyau a modifié la croissance des racines, mais à part la pénétration du revêtement extérieur, aucun dommage mécanique n'a été constaté.

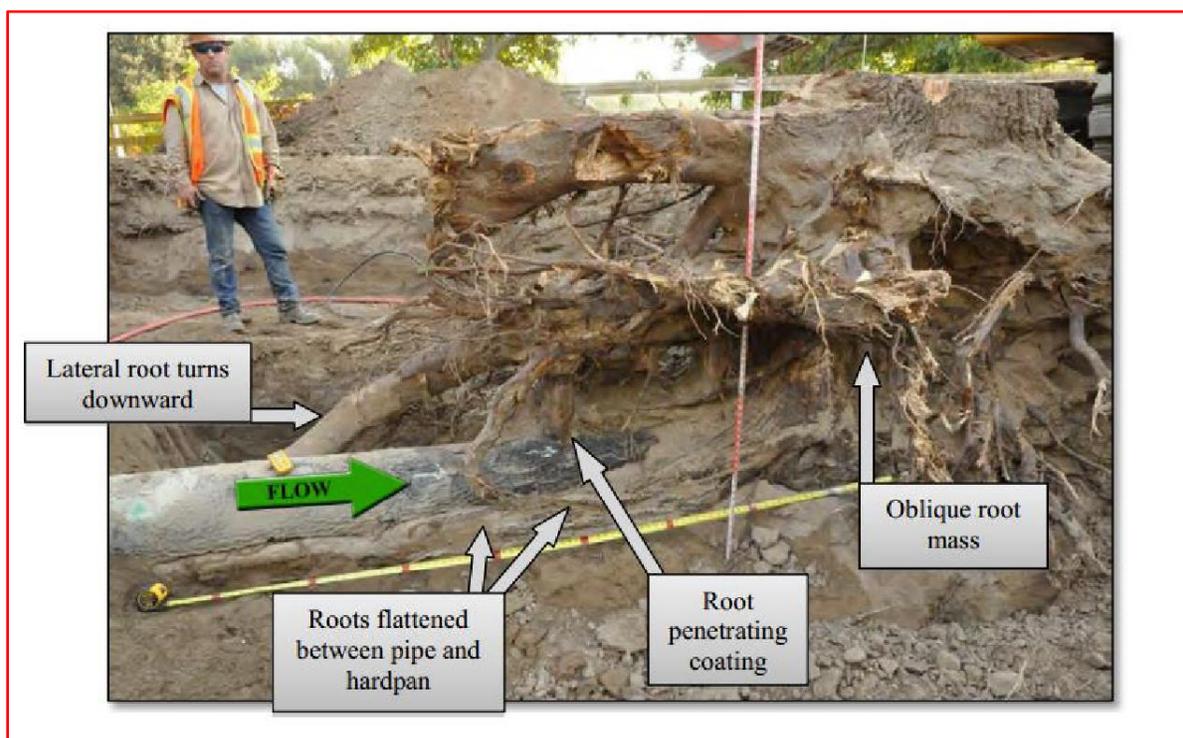


Figure 28 : Image de racines sur un tuyau de gaz naturel (Barnes & Ingemansson, 2015).

PG&E recommande traditionnellement l'utilisation d'une approche à trois niveaux pour les distances minimales de sécurité (PG&E, 2022). La "zone de sécurité du tuyau" se situe dans les premiers 1.5 m autour de la base de l'arbre, la "zone de bordure du tuyau" dans les 1.5 à 3 m suivants, et la "zone extérieure" à des distances supérieures à 3 m. Il est recommandé d'utiliser les types de végétation suivants dans chaque zone :

- **Zone de sécurité du tuyau** : pelouses, fleurs, herbes à faible profil et plantes herbacées à croissance basse
- **Zone de bordure du tuyau** : petits à moyens arbustes avec un tronc ou une branche principale de moins de 8 pouces de diamètre à maturité
- **Zone extérieure** : des arbustes de grande taille et de petits arbres avec un tronc de moins de 36 pouces de diamètre à maturité sont autorisés dans la zone extérieure. Cependant, il est recommandé de planter les arbres encore plus loin du conduit.

Ils illustrent, en outre, la nécessité de réaliser des évaluations relatives des risques pour les arbres potentiellement problématiques et d'établir si la surveillance, l'atténuation ou l'élimination sont les mesures les plus appropriées (Barnes & Ingemansson, 2015 ; PG&E, 2022). Ces évaluations doivent être effectuées au niveau du site (Barnes & Ingemansson, 2015). Une relation entre le DHP (diamètre hauteur poitrine) de l'arbre et la distance de plantation par rapport au tuyau a été déterminée et, dans la plupart des cas, la différenciation entre les arbres à faible et à plus haut risque commence à se produire pour des DHP supérieurs à 17 pouces ou 43 cm (Barnes & Ingemansson, 2015 ; Nidd et al., 2014). La Figure 29 donne des directives approximatives pour les mesures d'intervention en fonction de la taille de l'arbre et de la distance par rapport au tuyau.

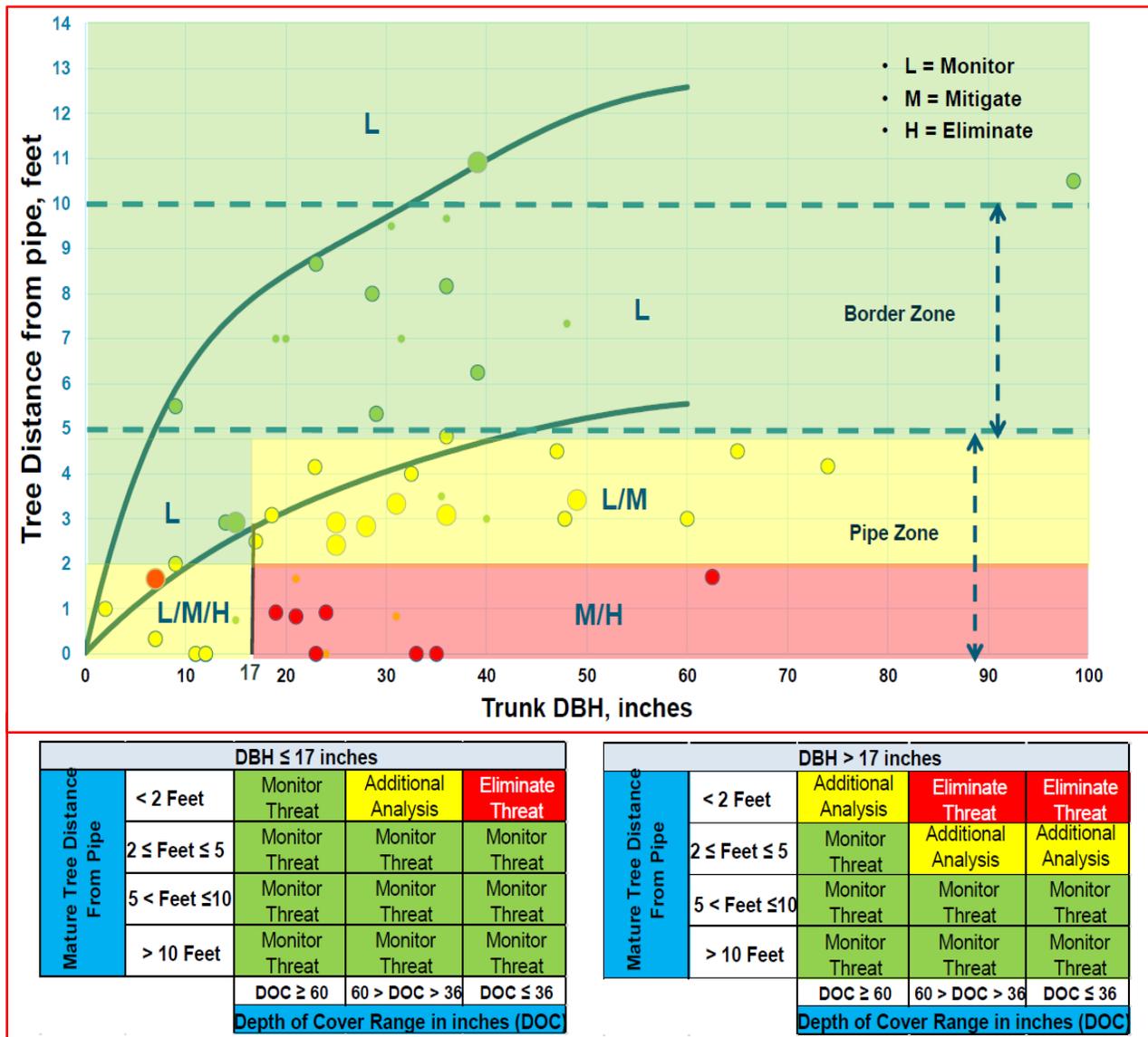


Figure 29 : Descriptif des distances minimales par diamètre (DBH) de l'arbre et évaluation de leur risque relative (Barnes & Ingemansson, 2015 ; Nidd et al., 2014).

Une des lacunes potentielles de l'utilisation de cette méthode est l'exclusion de la "profondeur" de l'analyse. Une évaluation de l'interférence des racines d'arbres financée par PG&E a constaté que le DHP (diamètre à hauteur de poitrine), l'espèce d'arbre, la profondeur du tuyau, la distance de l'arbre par rapport à l'axe du tuyau et le type de revêtement du conduit étaient tous des facteurs importants pour prédire les interactions des racines d'arbres avec les conduits (Nidd et al., 2014). Cette évaluation serait conforme à la littérature scientifique selon laquelle les arbres se trouvent principalement dans le premier mètre du sol, donc les tuyaux enfouis à des profondeurs plus importantes seraient moins susceptibles d'entrer en contact avec les racines. L'équipe a donc proposé un calcul de distance minimale modifié appelé facteur Z, dans lequel à la fois la profondeur du tuyau et la distance par rapport à l'arbre sont prises en compte (Nidd et al., 2014). Ici, plutôt que de considérer la distance X comme la mesure de distance minimale, la profondeur Y est également prise en compte, conduisant à Z, la "vraie" distance (Nidd et al., 2014 ; voir Fig. 30). Le facteur Z serait alors utilisé pour les mêmes recommandations de distance minimale à trois niveaux décrites précédemment.

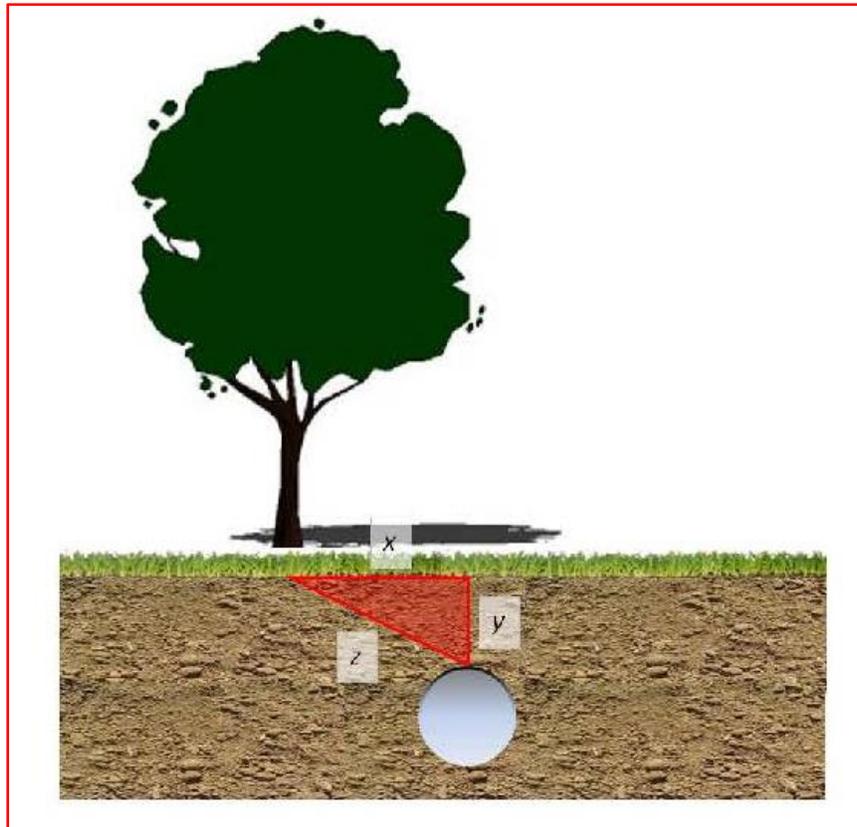


Figure 30 : Représentation du calcul pour le facteur Z (Nidd et al., 2014; Fig. 2).

Dans un contexte québécois, Énergir exige qu'une demande de plan soit soumise pour toute intervention impliquant des plantations d'arbres ou d'arbustes (GazMétro, 2015). L'entreprise insiste sur l'importance de respecter les distances minimales prescrites afin de garantir la sécurité des travaux à proximité des canalisations. Les distances minimales requises lors de travaux varient : un mètre pour les forages et 300 millimètres pour les autres réseaux souterrains. En ce qui concerne les plantations d'arbres, une marge de sécurité de 1,5 mètre entre la canalisation de gaz naturel et le tronc de l'arbre à maturité est impérative. Quant aux

arbustes, une distance minimale de 1 mètre entre la canalisation de gaz naturel et le tronc de l'arbuste à maturité doit être respectée (GazMétro, 2015).

Enfin, Schollaert et al. (2020) ont prouvé que les conduits de gaz naturel peuvent causer la mort des arbres en augmentant le méthane et en diminuant par la suite l'oxygène du sol. Il n'a pas été testé si les distances minimales mentionnées ci-dessus sont également valides du point de vue de la santé de l'arbre, ou simplement pour limiter le contact entre les racines et les conduits. La seule recommandation spécifique trouvée concernant ce problème était de planter des espèces de graminées ou d'arbustes hautement sensibles au-dessus des conduites de gaz pour identifier rapidement d'éventuelles fuites (International Society of Arboriculture, 2011). Cela pourrait théoriquement permettre d'intervenir et de procéder aux réparations avant que le problème ne devienne répandu et durable dans l'environnement.

CHAPITRE 4 — LACUNES DANS LES CONNAISSANCES EXISTANTES ET AXES DE RECHERCHE FUTURS SUGGÉRÉS

Selon cette revue de littérature, il est évident qu'il existe encore de nombreux aspects de la relation entre les services publics et la végétation sur lesquels nous ne savons rien, ou très peu. Les recherches existantes se sont principalement concentrées sur le réseau sanitaire. Même ici, elles sont restées relativement focalisées, rendant plus difficile l'extrapolation des informations à d'autres contextes. Nous savons encore étonnamment peu de choses sur les bases mêmes du comportement, des mécanismes et de la survie des racines dans les sols urbains, sans parler de leur interaction avec les réseaux publics souterrains. La plupart des informations dont nous disposons est d'ordre empirique, ou d'opinions d'experts; la recherche concrète, pratique ou quantifiable étant beaucoup plus rare – en partie en raison de la nature, coûteuse et complexe, de ce domaine d'étude. De plus, les études se concentrent sur le court terme et sur les effets des arbres individuels, alors qu'en réalité, les arbres persistent et évoluent sur plusieurs décennies, et il est difficile de distinguer à quel individu appartiennent la plupart des racines dans la plupart des milieux urbains. Pourtant, si nous espérons limiter les conflits à l'avenir et élaborer des plans d'urbanisme plus complets et durables, nous devons commencer à combler ces lacunes. Basés sur cette revue de littérature, nous identifions six lacunes de connaissances importantes sur lesquelles nous pourrions avoir un impact significatif:

- **Comportement des racines et impact sur les réseaux:** on comprend peu comment les systèmes racinaires de différentes espèces d'arbres interagissent avec différents types de réseaux souterrains, ce qui entraîne un manque de directives précises pour planter des arbres à proximité des réseaux.
- **Impact des infrastructures sur les arbres:** il existe peu de recherches globales sur la manière dont différents réseaux (tels que les égouts, les conduites d'eau, les câbles électriques) affectent la santé des arbres. Comprendre ces impacts pourrait permettre d'élaborer de meilleures stratégies de protection et d'entretien.
- **Techniques de plantation efficaces:** des recherches sont nécessaires pour identifier les méthodes et matériaux de plantation les plus efficaces pour les arbres en milieu urbain, surtout à proximité des réseaux souterrains, afin de minimiser les conflits et d'optimiser à la fois la santé des arbres et la fonctionnalité des réseaux.
- **Effets à long terme:** peu d'études examinent les impacts à long terme de la croissance des arbres sur les réseaux souterrains ou l'entretien nécessaire pour assurer la santé des arbres et la fonctionnalité des réseaux sur des périodes prolongées.
- **Directives spécifiques aux espèces:** les informations détaillées sur les espèces d'arbres spécifiques et leurs comportements racinaires en termes de propagation, de profondeur et de leur influence sur différents types de réseaux font défaut. Des directives adaptées à chaque espèce pourraient améliorer les pratiques d'urbanisme.
- **Effets cumulatifs des arbres et des réseaux:** les études se concentrent souvent sur des arbres individuels ou des réseaux uniques. Cependant, des lacunes de recherche subsistent concernant les effets cumulatifs de plusieurs arbres sur divers réseaux souterrains et vice versa, surtout dans les zones urbaines denses.

Comblent ces lacunes de recherche est crucial pour élaborer des directives et des stratégies visant à atténuer les conflits entre les arbres et les réseaux souterrains, assurant ainsi la durabilité et la fonctionnalité à la fois de la verdure urbaine et des infrastructures essentielles. Par conséquent, en nous concentrant principalement sur les besoins à Montréal et en Amérique du Nord, nous proposons les avenues de recherche possibles décrites ci-dessous. Le projet intègre des problèmes spécifiques discutés lors des réunions d'équipe avec les lacunes de connaissances connues dans le domaine d'étude. Nous sommes conscients que de tels projets seraient probablement accompagnés de coûts importants et d'un investissement en temps, en main-d'œuvre et en ressources. C'est pourquoi nous avons présenté la proposition de projet selon une approche graduelle, chaque étape devant être construite sur la précédente. Cela permettra, espérons-le, de simplifier l'économie des coûts globaux, tout en facilitant l'intégration de points d'arrêt (si le temps ou l'argent vient à manquer), tout en produisant toujours des résultats significatifs le long du chemin. En d'autres termes, des informations significatives, importantes et utiles peuvent toujours être produites même si tous les aspects du projet ne peuvent être entièrement réalisés.

4.1_ 1^{ère} partie : Portail de documentation des raisons d'intervention

Les interventions non planifiées ou prématurées sur les réseaux publics représentent des coûts importants. Cependant, savoir pourquoi des interventions sont nécessaires, et dans quelle mesure les arbres ou leurs racines y contribuent (le cas échéant) est souvent inconnu. De telles informations sont cruciales pour comprendre comment et pourquoi des conflits peuvent nécessiter une intervention, ainsi que pour prédire quand ils pourraient se reproduire. Pour combler cette lacune de connaissances, un portail de documentation pourrait être créé. Ces portails sont relativement simples à mettre en place et peuvent fournir une multitude d'informations. En saisissant des données simplifiées lors de chaque intervention, nous pouvons apprendre plusieurs choses telles que la fréquence des interventions liées aux arbres, les "types" d'interactions (pénétration, dommages mécaniques, ruptures, etc.), les facteurs contribuant aux interactions négatives avec les arbres, les services publics les plus impactés, etc.

Les coûts initiaux pour mettre en place le portail de documentation sont minimes, de même que les coûts de "maintenance générale". La plus grande contribution serait en temps : temps nécessaire pour saisir les données pendant ou immédiatement après une intervention (minimal, car les formulaires peuvent être simplifiés), temps nécessaire pour collecter suffisamment de données, et temps nécessaire pour analyser et synthétiser les données acquises. De plus, la coordination entre les différentes entreprises de services publics sur l'importance d'une telle étude sera cruciale. Selon l'intérêt, le portail pourrait être limité à un seul type de réseau public ou ouvert à tous.

4.2_ 2^{ème} partie : Où sont les racines des arbres?

Les racines sont l'impact principal, qualifié de 'négatif', en ce qui concerne les effets des arbres sur les réseaux souterrains. Plusieurs recommandations portent sur les "distances minimales", mais la vérité est qu'il n'existe pas de recherche pour étayer qu'elles doivent être ces distances, si elles varient selon les espèces, ou si elles diffèrent en fonction de l'âge de l'arbre, de sa taille, voire de sa hauteur. Ainsi, savoir où se trouvent réellement les racines des arbres, plutôt qu'une « règle du pouce », est un aspect extrêmement important pour limiter correctement et précisément les conflits avec les réseaux souterrains. Nous suggérons donc un projet visant à :

Comprendre l'architecture du système racinaire des arbres dans les environnements urbains. De nombreuses techniques non destructrices pourraient être utilisées en tandem pour y parvenir (telles que le GPR et le traçage par isotopes stables).

Évaluer la propagation verticale et horizontale des racines, ainsi que la biomasse racinaire, le tout en relation avec la taille et l'espèce des arbres.

Non seulement ces informations sont essentielles dans un contexte local, mais cette étude serait unique à l'échelle mondiale, car aucune autre aussi complète n'a été trouvée lors de l'examen de la littérature. Elle serait inestimable pour les guides actuels et futurs liés à la plantation et à la gestion des arbres, ainsi que pour celui en cours de développement pour les réseaux souterrains. Cependant, comme mentionné précédemment, une telle étude n'est généralement pas réalisée en raison du coût inhérent et des ressources nécessaires pour la mener à bien. La portée du projet pourrait donc être ajustée en fonction des fonds disponibles. Cela nécessiterait une discussion et des détails supplémentaires. Néanmoins, il est impératif de souligner que tout travail dans ce domaine serait un premier pas crucial pour combler le vaste fossé de connaissances.

4.3_ 3^{ème} partie : Analyses des pannes et interventions : identification des facteurs à risque et prédiction des interventions futurs

En combinant les résultats des parties 1 et 2, ainsi qu'en intégrant des éléments connexes, nous pouvons commencer à construire un modèle global pour analyser le conflit. Nous proposons d'utiliser un SIG comme plateforme pour mieux analyser et évaluer les facteurs de risque liés aux interventions afin de mieux prédire et anticiper les futures interventions. Au minimum, nous aurions déjà les points d'interventions géoréférencés et leurs données associées de la partie 1 - bien qu'idéalement, nous aurions également le réseau de services publics géoréférencé également (surtout pour l'aspect de la « prédiction »).

En plus des interventions géoréférencées (et du réseau de services publics), l'inventaire existant des arbres et toutes infrastructures géoréférencées existantes (trottoirs, routes, pistes cyclables, etc.) seraient ajoutés pour créer un portrait plus complet de l'environnement urbain et des facteurs possibles. Nous pourrions compléter cela avec la surveillance par CCTV, des investigations GPR et les données pertinentes collectées dans la partie 2 sur l'architecture, la propagation et la biomasse des racines. L'objectif serait d'IDENTIFIER les facteurs les plus susceptibles de causer un conflit et ceux qui semblent favoriser une coexistence pacifique, ainsi

que d'ÉVALUER le risque relatif et l'ampleur globale de chaque facteur. Enfin, nous viserions à utiliser ces informations, superposées aux données géoréférencées existantes, pour PRÉDIRE les zones probablement conflictuelles et/ou nécessitant une intervention future.

Un projet d'une telle envergure serait probablement coûteux et nécessiterait une grande équipe multidisciplinaire. Pour limiter certains coûts, l'évaluation pourrait être limitée à un seul service public pour commencer - idéalement celui avec le plus d'informations disponibles, celui où le réseau est déjà géoréférencé ou cartographié d'une certaine manière, celui qui est le plus impacté actuellement par ce conflit et qui bénéficierait donc le plus d'un modèle prédictif, et/ou celui dont l'accès n'est pas trop restreint. Dans la littérature, ce type de projet a été mené pour les réseaux d'égouts dans des pays étrangers, qui pourraient servir de guide. Limiter l'étude au réseau d'égouts pourrait être une stratégie efficace pour réduire les coûts, en particulier s'il s'agit du réseau le plus impacté, comme cela est suggéré de manière plus générale dans la littérature. Cependant, dans un monde idéal sans contraintes de ressources, une telle étude serait menée sur l'ensemble du réseau de services publics.

RÉFÉRENCES

- Alani, A. M., & Lantini, L. (2020). [Recent Advances in Tree Root Mapping and Assessment Using Non-destructive Testing Methods: A Focus on Ground Penetrating Radar](#). *Surveys in Geophysics*, 41(3), 605–646.
- Al-Bayati, A. J., & Panzer, L. (2020). [Reducing Damages to Underground Utilities: Importance of Stakeholders' Behaviors](#). *Journal of Construction Engineering and Management*, 146(9).
- American Society of Consulting Arborists. (1989). *Protecting trees during construction: answers to frequently asked questions for builders and property owners*.
- Barker, P. A., & Peper, P. J. (1995). [Strategies to prevent damage to sidewalks by tree roots](#). *Arboricultural Journal*, 19(3), 295–309.
- Barnes, B., & Ingemansson, B. (2015). *Analysis of Risk Due to Trees Near Pipelines*.
- Benson, A. R., & Morgenroth, J. (2019). [Root pruning negatively affects tree value: A comparison of tree appraisal methods](#). *Urban Forestry and Urban Greening*, 43.
- Bernard, K. E., Dennis, C., & Jacobi, W. R. (2003). Protecting Trees During Construction. *Colorado State University Extension*. www.ext.colostate.edu
- BNQ. (2018). *Aménagement paysager à l'aide de végétaux*.
- Borelli, S., Conigliaro, M., & Di Cagno, F. (2023). [Urban forests: a global perspective](#). In *Urban forests: a global perspective*. FAO.
- British Standard Institute. (1989). *British Standard Guide for: Trees in relation to construction*. British Standard Institute Publication #10285.
- Chapman, R. L. (1982). [The public utilities and trees](#). *Arboricultural Journal*, 6(3), 205–209.
- City of Brantford. (2022). *Utilities: Design and Construction Manual Linear Municipal Infrastructure Standards*.
- City of Brantford. (2023a). *Roads and Transportation: Design and Construction Manual Linear Municipal Infrastructure Standards*.
- City of Brantford. (2023b). *Sanitary Sewers: Design and Construction Manual Linear Municipal Infrastructure Standards*.
- City of Calgary. (2019). *Contractor Environmental Responsibilities Package (CERP)*.
- City of Guelph. (2019). *City of Guelph Tree Technical Manual*.
- City of London. (2003). *Design Specifications & Requirements Manual*.
- City of Maple Ridge. (2023). *Design and Construction Documents Part 1: Design Criteria Manual*.
- City of Medicine Hat. (2020). Parks and Recreation Tree Protection Specifications. In 2020.
- City of Phoenix. (2010). *Tree and Shade Master Plan*.

- City of Vancouver. (2016). *Utilities Design & Construction Manual*.
- City of Vancouver. (2019). *Engineering Design Manual*.
- Comery, W. (2000). Tree roots versus sidewalks and sewers. In J. Kuser (Ed.), *Handbook and Community Forestry in the Northeast* (pp. 227–242). Kluwer Academic/Plenum Publishers.
- Costello, L., & Jones, K. (2003). *Reducing infrastructure damage by tree roots: A compendium of strategies*. Western Chapter of the International Society of Arboriculture.
- Day, S. D., Wiseman, P. E., Dickinson, S. B., & Harris, J. R. (2010a). [Contemporary concepts of root system architecture of urban trees. *Arboriculture and Urban Forestry*, 36\(4\), 149–159.](#)
- Day, S. D., Wiseman, P. E., Dickinson, S. B., & Harris, J. R. (2010b). [Tree root ecology in the Urban environment and implications for a sustainable rhizosphere. *Arboriculture and Urban Forestry*, 36\(5\), 193–205.](#)
- Dennis, C., & Jacobi, W. R. (2020). Protecting trees during construction. *Colorado State University Extension*.
- Deshaies, P.-D., Rouyère, N., & Larochelle, A. (2021). *Guide de plantation d'arbres en milieu urbain*.
- Desilva, D., Marlow, D., Beale, D., & Marney, D. (2011). Sewer Blockage Management: Australian Perspective. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 2, 139–145.
<http://www.surveymonkey.com/>
- Drangsholt, S. H., Reed, L. J., Marré, B. J., & Lee, A. H. (2013). *We Can Fix That: Ten Years of Seattle Public Utilities Retrofit Program Successes*.
- Esquimalt. (n.d.). *Avoiding Tree Damage During Construction*.
- Fini, A., Ferrini, F., Frangi, P., Piatti, R., & Amoroso, G. (2013). [Effects of root severance by excavation on growth, physiology and uprooting resistance of two urban tree species. *Acta Horticulturae*, 990, 487–494.](#)
- Fini, A., Frangi, P., Mori, J., Sani, L., Vigevani, I., & Ferrini, F. (2020). [Evaluating the effects of trenching on growth, physiology and uprooting resistance of two urban tree species over 51-months. *Urban Forestry and Urban Greening*, 53.](#)
- Fleckenstein, C., Dervishi, V., Rahman, M. A., Rötzer, T., Pauleit, S., & Ludwig, F. (2022). [Trees in Planters—A Case Study of Time-Related Aspects. *Land*, 11\(8\).](#)
- Frédette, C. (2023). *Guide d'introduction aux infrastructures végétalisées: Informations générales et bonnes pratiques*.
- Frédette, C., & Trickey-Massé, M. (2023). *Plantations en milieu urbanisé*.
- Garrick, S. (2018). [Effective Strategies to Manage Underground Utilities and Urban Trees in Public Rights-of-Way.](#)
- GazMétro. (2015). *Guide des travaux: À proximité des réseaux Gaziers*.

- Harris, R. (1983). *Arboriculture: Care of trees, shrubs and vines in the landscape*. Prentice-Hall.
- Harris, R., Clark, J., & Matheny, N. (1999). *Arboriculture, integrated management of landscape trees, shrubs, and vines* (3rd ed.). Prentice-Hall.
- Hauer, R. J., Miller, R. W., & Ouimet, D. M. (1994). Street tree decline and construction damage. *Journal of Arboriculture*, 20, 94–97.
- Hauer, R., & Peterson, W. (2015). [Municipal Tree Care and Management in the United States. Conference Proceedings of the International Society of Arboriculture 91st Annual Conference & Trade Show.](#)
- Hetherington, R. (1994). [Trenching and street trees: Local co-operation and liaison. *Arboricultural Journal*, 18\(3\), 237–245.](#)
- Hydro Ottawa. (2009). *Tree Planting Advice*. www.hydroottawa.com/feedback
- Hydro-Québec. (2022). *Le bon arbre au bon endroit: Réseau électrique souterrain*.
- International Society of Arboriculture. (2011). *Avoiding Tree & Utility Conflicts*. www.treesaregood.org
- Jaw, S. W., & Hashim, M. (2013). [Locational accuracy of underground utility mapping using ground penetrating radar. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 35, 20–29.](#)
- Jey, K., & Jeyapalan, P. E. (2005, June 6). Installing and operating underground power distribution by sharing existing pipelines, tunnels, and rights of way. *18th International Conference on Electricity Distribution*.
- Jim, C. Y. (1998a). [Impacts of intensive urbanization on trees in Hong Kong. *Environmental Conservation*, 25\(2\), 146–159.](#)
- Jim, C. Y. (1998b). [Pressure on urban trees in hong kong: Pervasive problem and possible amelioration. *Arboricultural Journal*, 22\(1\), 37–60.](#)
- Jim, C. Y. (2001). [Managing Urban Trees and Their Soil Envelopes in a Contiguously Developed City Environment.](#)
- Jim, C. Y. (2003). [Protection of urban trees from trenching damage in compact city environments. *Cities*, 20\(2\), 87–94.](#)
- Jim, C. Y. (2013). [Sustainable urban greening strategies for compact cities in developing and developed economies. *Urban Ecosystems*, 16\(4\), 741–761.](#)
- Jim, C. Y. (2019). [Resolving intractable soil constraints in urban forestry through research–practice synergy. *Socio-Ecological Practice Research*, 1\(1\), 41–53.](#)
- Jung, Y. J., & Sinha, S. K. (2007). [Evaluation of Trenchless Technology Methods for Municipal Infrastructure System. *Journal of Infrastructure Systems*, 13, 144–156.](#)
- Kelsey, P. (1993). Evaluating Tree Planter Health: Soil Chemical Properties. In G. Watson & D. Neely (Eds.), *The Landscape Below Ground: Proceedings of an International Workshop on Tree Root Development in Urban Soils* (pp. 211–218). International Society of Arboriculture.

- Klimenta, D., Kuč, V., Raičević, V., Radosavljevič, J., Jevtič, M., & Tasič, D. (2010). [FEM modelling of faults occurred in buried power cables due to the removal of tree roots. *European Transactions on Electrical Power*, 20\(8\), 1237–1254.](#)
- Kuliczowska, E., & Parka, A. (2017). [Management of risk of tree and shrub root intrusion into sewers. *Urban Forestry & Urban Greening*, 21, 1–10.](#)
- Lantini, L., Giannakis, I., Tosti, F., Mortimer, D., & Alani, A. M. (2020). A Reflectivity-Based GPR Signal Processing Methodology for Mapping Tree Root Systems of Street Trees. *43rd International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*, 702.
- Lester, J., & Bernold, L. E. (2007). [Innovative process to characterize buried utilities using Ground Penetrating Radar. *Automation in Construction*, 16\(4\), 546–555.](#)
- Leucci, G. (2010). [The use of three geophysical methods for 3D images of total root volume of soil in urban environments. *Exploration Geophysics*, 41\(4\), 268–278.](#)
- Limoges, S., Pham, T. T. H., & Apparicio, P. (2018). [Growing on the street: Multilevel correlates of street tree growth in Montreal. *Urban Forestry and Urban Greening*, 31, 15–25.](#)
- Marlow, D. R., Boulaire, F., Beale, D. J., Grundy, C., & Moglia, M. (2011). [Sewer Performance Reporting: Factors That Influence Blockages. *Journal of Infrastructure Systems*, 17\(1\), 42–51.](#)
- Mattheck, C., & Bethge, K. (1999). [Biomechanical study on the interactions of roots with gas and water pipelines for the evaluation of tree sites. *Arboricultural Journal*, 23\(4\), 343–377.](#)
- McPherson, G. E., & Peper, P. J. (1995). Infrastructure Repair Costs Associated with Street Trees in 15 Cities. *Trees and Building Sites: Proceedings of an International Workshop on Trees and Buildings*, 49–64.
- Miladinovic, V. (2016). [Tree Protection Policy and Specifications for Construction Near Trees.](#)
- Miller, F. (1993). The effect of trenching on growth and overall plant health of selected species of shade trees. In G. Watson & D. Neely (Eds.), *The Landscape Below Ground: Proceedings of an International Workshop on Tree Root Development in Urban Soils* (pp. 157–164). International Society of Arboriculture.
- Miller, F. D., & Neely, D. (1993). The effect of trenching on growth and plant health of selected species. *Journal of Arboriculture*, 19, 226–229.
- Miller, F. D., & Neely, D. (1994). The long term effect of utility trenching on growth and overall plant health of selected species of shade trees. *Arboriculture Journal*, 18(3), 289–297.
- Mohammadi, M. M., Najafi, M., Salehabadi, N., Serajiantehrani, R., & Kaushal, V. (2020). Predicting Condition of Sanitary Sewer Pipes with Gradient Boosting Tree. *Pipelines*.
- Mohd Idris, N. I., & Cameron, R. W. F. (2020). [Cut-off in their prime? Response of two landscape shrubs to different levels of root pruning, during active and quiescent growth phases. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, 95\(6\), 734–745.](#)

- Morell, J. (1984). Parkway tree augering specifications. *Journal of Arboriculture*, 10(5), 129–132.
- Morgenroth, J. (2008). A Review of Root Barrier Research. *Arboriculture & Urban Forestry*, 34(2), 84–88.
- Mullaney, J., Lucke, T., & Trueman, S. J. (2015). [A review of benefits and challenges in growing street trees in paved urban environments. *Landscape and Urban Planning*, 134, 157–166.](#)
- National Joint Utilities Group. (2007). *NJUG guidelines for the planning, installation and maintenance of utility apparatus in proximity to trees - Volume 4*.
- Nichols, P., McCallum, A., & Lucke, T. (2017). [Using ground penetrating radar to locate and categorise tree roots under urban pavements. *Urban Forestry & Urban Greening*, 27, 9–14.](#)
- Nicklin, A., Paez-Alonso, G., Hillier, J., Kwon, C., Lazar, M., Bridgeman, D., Honsinger, K., Sanati, E., Klitta, A., Evers, J., Mitchell, J., Allsopp, B., Biberstein ARUP Harold Sich, R., Bontius, K., & Biberstein, R. (2013). *Tree Planting Solutions in Hard Boulevard Surfaces: Best Practice Manual*.
- Nicoll, B. C., & Ray, D. (1996). Adaptive growth of tree root systems in response to wind action and site conditions. *Tree Physiology*, 16, 891–898.
- Nidd, P., Lucadou, L., & Hanks, M. (2014). *Tree Root Interference Assessment*. www.dynamicrisk.net
- Nowak, D., & Dwyer, J. (2000). Understanding the benefits and costs of urban forest ecosystems. In J. Kuser (Ed.), *Handbook and Community Forestry in the Northeast* (pp. 11–26). Kluwer Academic/Plenum Publishers.
- Obradović, D. (2017). [The impact of tree root systems on wastewater pipes. *ZAJEDNIČKI TEMELJI*, 65–71.](#)
- Ossola, A., Yu, M., Le Roux, J., Bustamante, H., Uthayakumaran, L., & Leishman, M. (2023). [Research note: Integrating big data to predict tree root blockages across sewer networks. *Landscape and Urban Planning*, 240.](#)
- Östberg, J., Martinsson, M., Ståhl, Ö., & Fransson, A. M. (2012). [Risk of root intrusion by tree and shrub species into sewer pipes in Swedish urban areas. *Urban Forestry and Urban Greening*, 11\(1\), 65–71.](#)
- Parriaux, A., Blunier, P., Maire, P., & Tacher, L. (2007). The DEEP CITY Project: A Global Concept for a Sustainable Urban Underground Management. *11th ACUUS Conference*.
- Pepper, P. J., & Barker, P. A. (1993). A buyer's guide to root barriers. In *The landscape below ground: Proceedings of an international workshop on tree root development in urban soils* (Vol. 1, pp. 189–193).
- Perry, T. O. (1969). [Tree Roots: Facts and Fallacies. *Arnoldia*, 49, 1–21.](#)
- PG&E. (2022). *Gas Transmission Vegetation Management Guide to Safe Landscaping Near Gas Pipelines*.
- Pohls, O., Bailey, N. G., & May, P. B. (2004). [Study of Root Invasion of Sewer Pipes and Potential Ameliorative Techniques. *Proceedings of the International Conference on Urban Horticulture*, 113–121.](#)
- Prax, P., & Ermák, J. (2004). [Urban Tree Root Systems and Tree Survival Near Sewers and Other Structures. *Enhancing Urban Environment by Environmental Upgrading and Resotration*, 45–56.](#)

[Randrup, T. \(2000\). Occurrence of tree roots in danish municipal sewer systems. *Arboricultural Journal*, 24\(4\), 283–306.](#)

Randrup, T. B., Mcpherson, / E Gregory, & Costello, L. R. (2001). Tree Root Intrusion in Sewer Systems: Review of Extent and Cost. *Journal of Infrastructure Systems*, 2–31.

Randrup, T. B., & Mcpherson, E. G. (2001). [A review of tree root conflicts with sidewalks, curbs, and roads. *Urban Ecosystems*, 5, 209–225.](#)

Ridgers, D., Rolf, K., & Stål, Ö. (2006). [Management and planning solutions to lack of resistance to root penetration by modern pvc and concrete sewer pipes. *Arboricultural Journal*, 29\(4\), 269–290.](#)

Roberts, J., Jackson, N., & Smith, M. (2006). *Tree roots in the built environment*. the Stationary Office (TSO).

Rogers, C. D. F., Hao, T., Costello, S. B., Burrow, M. P. N., Metje, N., Chapman, D. N., Parker, J., Armitage, R. J., Anspach, J. H., Muggleton, J. M., Foo, K. Y., Wang, P., Pennock, S. R., Atkins, P. R., Swingler, S. G., Cohn, A. G., Goddard, K., Lewin, P. L., Orlando, G., ... Saul, A. J. (2012). [Condition assessment of the surface and buried infrastructure - A proposal for integration. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 28\(1\), 202–211.](#)

Rolf, K., & Stal, O. (1994). TREE ROOTS IN SEWER SYSTEMS IN MALMO, SWEDEN. In *Journal of Arboriculture* (Vol. 20, Issue 6).

Schnelle, M. A., Feucht, J. R., & Klett, J. E. (1989). Root systems of trees - Facts and Fallacies. *Journal of Arboriculture*, 15(9), 201–205.

Schollaert, C., Ackley, R. C., DeSantis, A., Polka, E., & Scammell, M. K. (2020). [Natural gas leaks and tree death: A first-look case-control study of urban trees in Chelsea, MA USA. *Environmental Pollution*, 263.](#)

Schollen & Company Inc., Urban Forest Innovations, TMIG, & DPM. (2017). *Toronto Green Streets Technical Guidelines*.

Shi, F., Meng, Q., Pan, L., & Wang, J. (2023). [Root damage of street trees in urban environments: An overview of its hazards, causes, and prevention and control measures. In *Science of the Total Environment* \(Vol. 904\). Elsevier B.V.](#)

Sillick, J., & Jacobi, W. (2013). Healthy Roots and Healthy Trees. *Colorado State University Extension*. www.ext.colostate.edu

Siu, C. F., Wang, M., & Cheng, J. C. P. (2022). [A framework for synthetic image generation and augmentation for improving automatic sewer pipe defect detection. *Automation in Construction*, 137.](#)

Slater, D., & Chalmers, R. (2022). [Factors affecting the design coordination of trees and underground utilities in new developments in the UK. *Arboricultural Journal*, 44\(1\), 42–63.](#)

Smith, I. A., Dearborn, V. K., & Huttyra, L. R. (2019). [Live fast, die young: Accelerated growth, mortality, and turnover in street trees. *PLoS ONE*, 14\(5\).](#)

- Sousa-Silva, R., Duflos, M., Ordóñez Barona, C., & Paquette, A. (2023). [Keys to better planning and integrating urban tree planting initiatives. *Landscape and Urban Planning*, 231.](#)
- Stål, Ö. (1998). [The interaction of tree roots and sewers: The Swedish experience. *Arboricultural Journal*, 22\(4\), 359–367.](#)
- Strom, S. (2000). Urban and community forestry: planning and design. In J. Kuser (Ed.), *Handbook and Community Forestry in the Northeast* (pp. 77–94). Kluwer Academic/Plenum Publisher.
- Suchocka, M., Jankowski, P., & Błaszczuk, M. (2019). [Tree protection on construction sites – Knowledge and perception of Polish professionals. *Urban Forestry and Urban Greening*, 46.](#)
- Tanguy, O., Martins, K. T., Maure, F., St-Denis, A., & Hallmich, C. (2002). *Augmenter l'adaptation équitable aux changements climatiques: Scénarisation de la plantation de 500 000 nouveaux arbres sur le territoire de la Ville de Montréal.*
- Thomson, J., & Rumsey, P. (1997). [Trenchless technology applications for utility installation. *Arboricultural Journal*, 21\(2\), 137–143.](#)
- Torres, M. N., Rodríguez, J. P., & Leitão, J. P. (2017). [Geostatistical analysis to identify characteristics involved in sewer pipes and urban tree interactions. *Urban Forestry and Urban Greening*, 25, 36–42.](#)
- Township of Springwater. (2019). *Engineering Design Standards and Specifications Manual.*
- Turner-Skoff, J. B., & Cavender, N. (2019). [The benefits of trees for livable and sustainable communities. *Plants People Planet*, 1\(4\), 323–335.](#)
- Ugolini, F., Massetti, L., Sanesi, G., & Pearlmutter, D. (2015). [Knowledge transfer between stakeholders in the field of urban forestry and green infrastructure: Results of a European survey. *Land Use Policy*, 49, 365–381.](#)
- Ville de Montréal. (2002). *Guide des distances de dégagement des arbres avec les infrastructures urbaines et les réseaux techniques urbains (RTU).*
- Ville de Montréal. (2022). *Annexe 2: Exigences pour la conservation et la protection des arbres.*
- Watson, G. (1990). *Preventing construction damage to trees.* The Morton Arboretum information leaflet.
- Watson, G. W. (1998). Tree growth after trenching and compensatory crown pruning. *Journal of Arboriculture*, 24, 47–53.
- Watson, G. W., Hewitt, A. M., Cusic, M., & Lo, M. (2014). [The management of tree root systems in urban and suburban settings II: A review of strategies to mitigate human impacts. *Arboriculture and Urban Forestry*, 40\(5\), 249–271.](#)
- Widney, S., Fischer, B. C., & Vogt, J. (2016). [Tree mortality undercuts ability of tree-planting programs to provide benefits: Results of a three-city study. *Forests*, 7\(3\).](#)

Wolf, K. L., Lam, S. T., McKeen, J. K., Richardson, G. R. A., Bosch, M. van den, & Bardekjian, A. C. (2020). [Urban trees and human health: A scoping review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17\(12\), 1–30.](#)

Yusufu Kachaka, É. (2021). *La protection des arbres en ville pendant les grands travaux.*

La reproduction de ce document par quelque procédé que ce soit et sa traduction, même partielles, sont interdites sans l'autorisation du CERIU.

ISBN : 978-2-925413-03-5

Tous droits réservés.
© CERIU, mars 2024



Centre d'expertise
et de recherche
en infrastructures
urbaines

999, boul. de Maisonneuve, bur. 1620
Montréal (Québec) H3A 3L4, case postale 25

514 848-9885

info@ceriu.qc.ca
www.ceriu.qc.ca