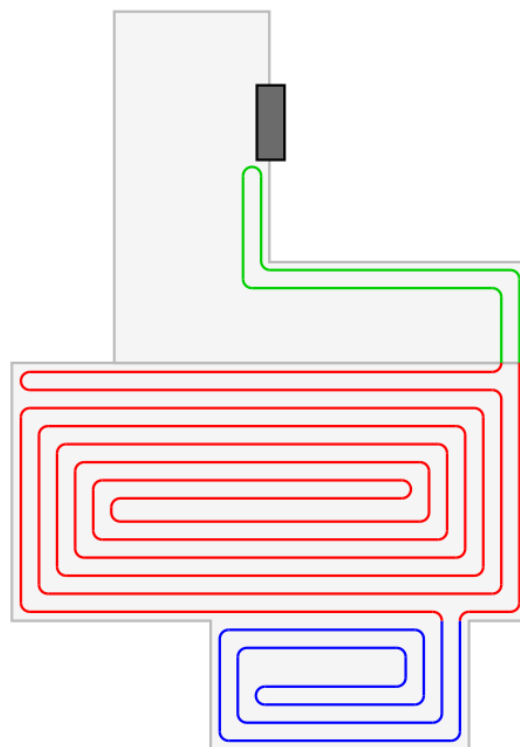


Travail de bachelor

Génération de chemin pour tuyaux de chauffage au sol



Étudiant

Fabien Terrani

Professeur responsable

Adrien Depeursinge

Date de soumission

31 juillet 2019

Résumé

Les systèmes de chauffage au sol hydrauliques requièrent la réalisation d'un plan de calepinage, un schéma du parcours suivi par les tuyaux. Afin d'assurer une chauffe efficace et uniforme, une méthode souvent utilisée dans l'industrie consiste à adopter un parcours en spirale, de l'extérieur vers l'intérieur de la zone à chauffer. En dehors de la problématique du parcours des tuyaux, le matériel nécessaire pour la pose du système doit également être déterminé.

Ce travail explore les possibilités d'automatisation du calepinage pour le système de chauffage au sol de l'entreprise OPAL SYSTEMS. Un algorithme permettant de remplir une zone grâce à un chemin en spirale est proposé ainsi qu'une méthode de calcul du matériel nécessaire. L'algorithme se limite aux cas simples les plus souvent rencontrés dans la pratique.

Une interface permettant la mise à l'échelle d'un plan et la saisie de polygones ainsi qu'une implémentation expérimentale de l'algorithme sont proposées. Le matériel nécessaire à la pose du système est calculé à partir des données retournées. Une évaluation qualitative des résultats obtenus est réalisée.

Mots-clefs

Chauffage au sol hydraulique, génération de chemin, serpent, spirale, calepinage, boucle.

Avant-propos

L'entreprise OPAL SYSTEMS fournit des services d'installation pour un système de chauffage au sol hydraulique réactif et à faible encombrement. Le processus interne suivi par l'entreprise depuis la réception du plan jusqu'à la pose du système est principalement manuel, y compris la réalisation du plan de calepinage renseignant sur le chemin suivi par les tuyaux au sol. Le matériel nécessaire pour la pose est également estimé manuellement.

Le but de ce travail est d'automatiser ce processus autant que possible, afin de réduire le temps nécessaire à la réalisation du plan de calepinage et à l'estimation du matériel nécessaire.

Les logiciels existants répondent bien aux besoins généraux de l'industrie. Cependant, les codes sources de leurs algorithmes de traçage ne sont pas accessibles librement. De plus, les besoins spécifiques d'OPAL SYSTEMS (utilisation de boucles parallèles, matériel propre au système utilisé) ne sont pas satisfaits. Enfin, les autres algorithmes existants examinés dans le cadre de ce travail répondent à des problématiques similaires mais pas identiques en termes de complexité, de contraintes et d'objectif.

L'algorithme et l'implémentation proposés ont donc été spécifiquement conçus pour répondre aux besoins d'OPAL SYSTEMS. Ce travail s'est concentré sur les cas d'utilisations simples et souvent rencontrés dans la pratique.

L'algorithme mis au point a été amélioré itérativement, au moyen de données de tests créées pour explorer les cas limites. Une évaluation qualitative des résultats a été réalisée par comparaison avec un cas réel de calepinage résolu manuellement.

La réalisation de l'état de l'art s'est avérée complexe, les termes utilisés dans la description du problème étant soit très généraux, soit très spécifiques. Selon les recherches effectuées, certaines pratiques de calepinage d'OPAL SYSTEMS (notamment celles désignées par *boucles parallèles* ou *double/triple... boucle* dans ce travail) ne semblent pas posséder de dénomination standard dans la recherche ou l'industrie.

L'absence d'algorithme standard pour le calepinage en spirale dans les travaux examinés a conduit à l'exploration d'autres domaines de recherche, principalement les algorithmes d'usinage de pièces par machine-outil CNC. L'existence d'algorithmes pertinents dans d'autres domaines de recherches non explorés dans ce travail (par exemple l'impression 3D) ne peut pas être exclue et justifierait des investigations supplémentaires.

Terminologie utilisée

Afin de faciliter la lecture, un lexique comprenant les principaux termes relatifs aux systèmes de chauffage au sol hydrauliques se trouve à la fin de ce document. Une définition informelle et une traduction anglaise sont proposées pour chaque terme.

Remerciements

Nous remercions monsieur le professeur Adrien Depeursinge pour son soutien, ses idées, ses suggestions et ses conseils avisés. Son encadrement de qualité et son expérience ont été très précieux durant la réalisation de ce travail.

Nous remercions monsieur Stephan Millius de l'entreprise OPAL SYSTEMS pour son implication, sa patience et sa disponibilité. Son aide a permis de comprendre en profondeur les contraintes de la problématique de ce travail.

Nous remercions l'entreprise OPAL SYSTEMS pour la mise à disposition des différents documents utilisés (schémas, plans de calepinage, photographies...) qui ont permis la réalisation de ce travail.

Table des matières

Résumé.....	I
Mots-clefs.....	I
Avant-propos.....	II
Terminologie utilisée.....	III
Remerciements.....	III
Liste des tableaux.....	VII
Liste des figures.....	VIII
Liste des équations.....	XI
Liste des abréviations.....	XII
1 Introduction.....	13
1.1 Les systèmes de chauffage.....	13
1.1.1 Sources de chaleur.....	13
1.1.2 Transport de la chaleur.....	13
1.2 Parcours des tuyaux de chauffe.....	14
1.3 Le système OPAL SYSTEMS.....	15
1.4 Parcours des tuyaux du système OPAL SYSTEMS.....	19
1.4.1 Emplacement du collecteur.....	19
1.4.2 Contraintes physiques.....	20
1.4.3 Uniformité de la chauffe.....	22
1.4.4 Simplicité de la pose.....	24
1.5 Intégration au processus d'entreprise.....	27
1.5.1 Intégration métier – Traitement à réaliser.....	27
1.5.2 Intégration technique – Formats de données.....	30
1.5.3 Estimation du matériel nécessaire.....	31
1.6 Hypothèse de travail.....	31
1.7 Limites.....	31
1.7.1 Intégration du système et calcul du matériel.....	31
1.7.2 Zones à chauffer.....	32



1.7.3	Zones de distribution	32
2	État de l'art.....	33
2.1	Logiciels industriels pour le chauffage au sol.....	33
2.2	Algorithmes de traçage	36
2.2.1	Algorithmes utilisés par les logiciels industriels	36
2.2.2	Algorithmes appliqués aux systèmes de chauffage	37
2.2.3	Travaux liés au parcours des tuyaux	38
2.2.4	Algorithmes de génération de chemin	38
2.3	Formats des données d'entrée/sortie	43
2.3.1	Exploitation du format DWG.....	43
2.3.2	Exploitation du format DXF.....	47
3	Méthodologie.....	49
3.1	Développement	49
3.1.1	Comportement de l'algorithme	50
3.1.2	Données en sortie	51
3.1.3	Données en entrée.....	56
3.1.4	Mécanique de traçage.....	57
3.1.5	Limitations de l'approche choisie.....	72
3.1.6	Implémentation des boucles parallèles.....	74
3.1.7	Applications au calepinage des chauffages au sol	74
3.2	Implémentation.....	78
3.2.1	Choix de technologie.....	79
3.2.2	Librairies et outils utilisés	81
3.2.3	Interface graphique et fonctionnalités	84
4	Résultats	91
5	Interprétation des résultats	95
6	Conclusion	97
7	Références.....	98
8	Annexe I – Lexique.....	101



8.1	Définitions	101
8.2	Termes français et anglais	101

Liste des tableaux

Tableau 1 Comparaison chiffrée des boucles séparées et des boucles parallèles.....	26
Tableau 2 Comparaison de logiciels industriels pour le chauffage au sol hydraulique	35
Tableau 3 Comparaison des outils de lecture/écriture du DWG.....	45
Tableau 4 Résultat des tests de lecture de fichiers DWG	45
Tableau 5 Comparaison d'architectures logicielles	80
Tableau 6 Comparaison des résultats du modèle avec la réalité	94

Liste des figures

Figure 1 Parcours serpentif et spirale	14
Figure 2 Panneau MDF rainuré	15
Figure 3 Diffuseur en aluminium	15
Figure 4 Tuyau PEX-A.....	16
Figure 5 Grillage aluminium.....	16
Figure 6 Pose de grillage aluminium sur les diffuseurs	17
Figure 7 Collecteur	17
Figure 8 Sortie de collecteur (boucles serrées).....	18
Figure 9 Schéma avec zones de distribution et zones à chauffer	19
Figure 10 Types de panneaux MDF utilisés par OPAL SYSTEMS	21
Figure 11 Panneaux MDF droit et virage	22
Figure 12 Simulation physique FlexPDE et Excel des motifs serpentif, double serpentif et spirale	23
Figure 13 Distribution thermique des motifs serpentif et spirale	23
Figure 14 Simplification de parcours en interrompant le chemin en spirale.....	24
Figure 15 Comparaison des boucles séparées et des boucles parallèles	25
Figure 16 Processus actuel suivi par OPAL SYSTEMS.....	28
Figure 17 Nouveau processus envisagé pour OPAL SYSTEMS	29
Figure 18 Illustration de l'algorithme en spirale de HeatingDesign.....	37
Figure 19 Illustration de l'algorithme en serpentif de HeatingDesign.....	37
Figure 20 Schéma d'un fraisage de surface.....	39
Figure 21 Génération de chemin en spirale sur poche elliptique.....	40
Figure 22 Chemins en spirale à espacements variables.....	40
Figure 23 Autre exemple de spirales à espacements variables	40
Figure 24 Chemin non spiral à largeur régulière	41
Figure 25 Combinaison de décalages intérieurs d'un contour pour former un chemin en spirale	42
Figure 26 Autre exemple de chemin en spirale par combinaisons de contours décalés.....	42
Figure 27 Exemple de polygone à remplir	50
Figure 28 Exemple de polygone rempli	50
Figure 29 Les trois types de sortie possibles de l'algorithme	51
Figure 30 Conversion du tracé en chemin de tuyau.....	52
Figure 31 Exemple de conversion de tracés en chemin de tuyau à différents angles	53
Figure 32 Principaux espacements respectés par le tracé.....	54
Figure 33 Mise en évidence de l'espace intérieur d'une boucle	54

Figure 34 Visualisation des espacements avec un chemin de tuyau	55
Figure 35 Polygone et segment de départ.....	56
Figure 36 Position actuelle, direction actuelle et segment actuel	58
Figure 37 Segments de collision des bords d'un polygone	58
Figure 38 Collision avec un bord de polygone	59
Figure 39 Sélection des intersections issues d'une collision	60
Figure 40 Fin d'itération 1 avec position suivante déterminée.....	61
Figure 41 Segments de collision d'un segment de tracé.....	61
Figure 42 Début de l'itération 2.....	62
Figure 43 Début de l'itération 4. Collision avec la position de départ.	62
Figure 44 Intersections de collision avec le premier segment du tracé.	63
Figure 45 Début d'un deuxième tour de spirale	64
Figure 46 Fin d'exécution de l'algorithme.....	64
Figure 47 Exemple de génération de tracés sur divers polygones convexes	64
Figure 48 Début du tracé d'un polygone concave.....	65
Figure 49 Évolution de tracé dans un polygone concave en l'absence de collision avec un sommet concave	66
Figure 50 Collision avec sommet concave.....	66
Figure 51 Poursuite du tracé dans un polygone concave jusqu'à complétion	67
Figure 52 Polygone avec zones non parcourues.....	67
Figure 53 Polygones décalés intérieurs avec deux trajets possibles.....	68
Figure 54 Correction de polygone décalé intérieur	69
Figure 55 Détection de zone déjà remplie	70
Figure 56 Détection des segments de tracé entourant une zone non parcourue	70
Figure 57 Détermination du point de départ dans une zone non parcourue.....	71
Figure 58 Deux tracés dans un polygone concave et les chemins de tuyaux résultants	71
Figure 59 Exemples de blocages du tracé.....	72
Figure 60 Variation du tracé en fonction du segment de départ.....	73
Figure 61 Détermination de la position de départ à différents angles.....	73
Figure 62 Variation d'échelle sur le même polygone.....	74
Figure 63 Exemple de raccord de tracés	75
Figure 64 Exemple de combinaison des tracés générés pour plusieurs zones	76
Figure 65 Fonctionnement de webpack.....	81
Figure 66 Structure du projet WebStorm	82
Figure 67 Plusieurs polygones décalés intérieurs calculés avec Flatten.js	83
Figure 68 Fonctionnalités du prototype.....	84
Figure 69 Zone de dessin SVG après dépôt d'une image.....	84

Figure 70 Modes possibles du prototype	85
Figure 71 Clic sur une cotation pour la mise à l'échelle	86
Figure 72 Saisie de la valeur de la cotation	86
Figure 73 Extraits de code faisant intervenir la mise à l'échelle	87
Figure 74 Délimitation de zones	87
Figure 75 Liste des zones	88
Figure 76 Chemins de tuyau générés superposés aux zones et au plan	88
Figure 77 Données retournées par l'algorithme	89
Figure 78 Calepinage importé dans Autodesk DWG TrueView.....	90
Figure 79 Les cinq zones du calepinage de test	91
Figure 80 Liste des zones avec noms et aires	91
Figure 81 Calepinage de test pour les zones 1 à 4	92
Figure 82 Calepinage de test pour la zone 5	93
Figure 83 Blocage du tracé après inclusion de la partie distribution de la boucle.....	95
Figure 84 Parcours irrégulier non suivi par l'algorithme	95
Figure 85 Bonne correspondance des zones 1 et 4 du calepinage de test	96

Liste des équations

Équation 1 Longueur totale du tuyau	77
Équation 2 Longueur totale de diffuseur	78
Équation 3 Nombre de panneaux virages.....	78
Équation 4 Nombre de panneaux droits	78

Liste des abréviations

ACI	AutoCAD Color Index
API	Application Programming Interface
ASCII.....	American Standard Code for Information Interchange
CAD	Computer-Aided Design
CAE.....	Computer-Aided Engineering
CAM	Computer-Aided Manufacturing
CAO	Conception Assistée par Ordinateur
CFD.....	Computational Fluid Dynamics
CNC	Computer Numerical Control
CSS.....	Cascading Style Sheet
DAO	Dessin Assisté par Ordinateur
DWG	DraWinG (format natif AutoCAD)
HTML	HyperText Markup Language
MDF	Medium Density Fiberboard
PDF.....	Portable Document Format
PEX.....	Polyethylene cross-linked ("X")
PNG	Portable Network Graphics
SDK.....	Software Development Kit
SVG	Scalable Vector Graphics
UFH.....	Underfloor Heating

1 Introduction

1.1 Les systèmes de chauffage

De façon générale, les systèmes de chauffage servent à assurer une température minimale dans un espace donné. Dans le cadre de notre problématique, nous nous intéressons plus spécifiquement aux systèmes de chauffage classiques, destinés aux espaces intérieurs. Ces systèmes sont utilisés pour chauffer les lieux de vie (logements, espaces de travail, espaces publics) mais également certains espaces industriels particuliers (conditionnement de locaux de production, de stockage...).

Bien que tous fassent évidemment intervenir une source de chaleur, la majorité des systèmes modernes permet également de distribuer la chaleur produite, afin qu'elle se diffuse dans des lieux distants de la source.

1.1.1 Sources de chaleur

La chaleur s'obtient par des sources d'énergie de différentes natures. Elles peuvent être réparties en deux catégories :

- Les sources d'énergie calorifères, principalement :
 - combustion (de bois, charbon, mazout (fuel, fioul), gaz naturel, biomasse...)
 - soleil
 - géothermie
 - biomasse
 - ...
- les sources d'énergie à convertir (nucléaire, éolienne, hydroélectricité...)

1.1.2 Transport de la chaleur

Le transport de la chaleur afin de la propager dans un espace donné s'obtient en faisant circuler un corps chauffant : un liquide chaud, un gaz chaud ou du courant électrique (effet Joule). Ce transport requiert la plupart du temps l'utilisation d'un conduit permettant de canaliser et diriger le corps chauffant en question, qu'il soit fluide (eau, gaz) ou métallique dans le cas de l'électricité.

La problématique de ce travail concerne les systèmes de chauffage au sol. Ceux-ci sont répartis en deux catégories :

- **Chauffage au sol hydraulique** : de l'eau préalablement chauffée circule dans des tuyaux

- **Chauffage au sol électrique** : du courant électrique circule dans des câbles (la chaleur est produite par effet Joule)

Dans les deux cas, les tuyaux (ou câbles) sont généralement placés sous le sol de l'espace à chauffer et transmettent la chaleur par conduction thermique.

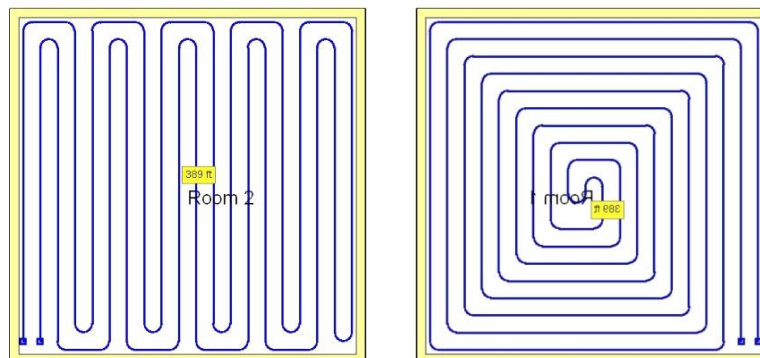
Dans la suite de ce document, nous nous intéresserons spécifiquement aux systèmes de chauffage au sol hydraulique et, plus spécifiquement, au parcours suivi par les tuyaux.

1.2 Parcours des tuyaux de chauffe

Bien que le procédé de production de chaleur puisse varier, la problématique du trajet à faire parcourir par les tuyaux reste la même. Afin d'assurer une chauffe régulière, il est nécessaire de faire circuler l'eau chauffée de façon à ce qu'elle parcoure entièrement et uniformément la zone à chauffer. Le trajet effectué implique la plupart du temps deux stratégies, illustrées dans la Figure 1 :

- **Parcours en serpent** : le tuyau fait des allers-retours d'un côté à l'autre de la zone, puis retourne à son point de départ.
- **Parcours en spirale (ou escargot)** : le tuyau suit le bord de la zone, de l'extérieur vers l'intérieur, puis retourne à son point de départ en faisant « demi-tour ».

Figure 1 Parcours serpent et spirale



Le serpent en contre-flux (gauche) et la spirale (droite), deux motifs récurrents dans le calepinage des chauffages au sol hydrauliques. Source : Avenir Software Inc.

Même si ces deux stratégies restent très régulièrement utilisées, la teneur exacte du parcours dans son entier peut s'avérer inclassable et tout à fait unique, de par la diversité de forme des zones à couvrir. En effet, le parcours est influencé par plusieurs facteurs :

- **La forme de la zone à chauffer** : les tuyaux devant parcourir la zone, celle-ci influence évidemment le tracé
- **Le type de tuyau** : implique de rester au-dessus d'un rayon de courbure minimum

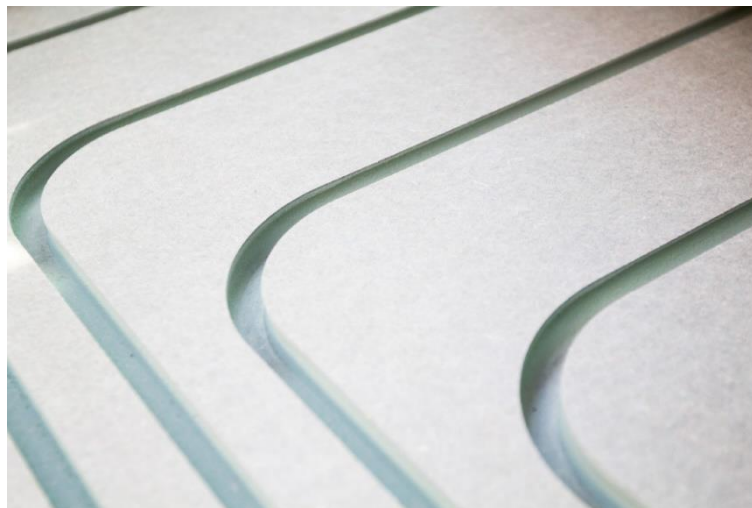
- **La conduction thermique** : selon le système de chauffage au sol utilisé, un espacement spécifique entre tuyaux est recommandé, ainsi qu'une longueur de boucle maximale.
- **Le système de fixation au sol** : Il en existe plusieurs types. Même si dans l'ensemble ils permettent une grande liberté (agrafage, rail de fixation), certains imposent de légères restrictions (attaches à une grille métallique, panneau à plots, panneau rainuré). Ils sont habituellement rendus compatibles avec le rayon de courbure du tuyau utilisé.

Ces variables engendrent une large variété de contraintes dont l'analyse exhaustive excède la portée de ce travail. Nous nous restreindrons aux contraintes imposées par le système de chauffage au sol de l'entreprise OPAL SYSTEMS.

1.3 Le système OPAL SYSTEMS

OPAL SYSTEMS est une entreprise belge inventrice d'un nouveau type de chauffage hydraulique par le sol. Contrairement aux systèmes classiques qui utilisent une chape (coulage de matière autour de l'élément chauffant) et sont par conséquent épais, le système d'OPAL SYSTEMS utilise des panneaux de bois MDF (Medium Density Fiberboard, mélange de fibres de bois et de résine) préfabriqués, d'environ 2 cm de hauteur (Figure 2).

Figure 2 Panneau MDF rainuré



Un panneau MDF rainuré par fraisage. Les tuyaux passent par les rainures creusées dans les panneaux.

Source : OPAL SYSTEMS

La matière est creusée par fraisage sur la quasi-totalité de sa hauteur. Cette cavité est ensuite enveloppée d'un diffuseur en aluminium (Figure 3), destiné à assurer un transfert de chaleur efficace.

Figure 3 Diffuseur en aluminium



Un diffuseur en aluminium (profil « oméga »). Source : OPAL SYSTEMS

Une fois que le diffuseur recouvre les parois de la cavité, un tuyau en polyéthylène réticulé (Figure 4) est inséré tout au long du tracé. Le tuyau pousse le diffuseur dans la tranchée MDF, puis le diffuseur se resserme autour du tuyau et maintient ce dernier fermement en place.

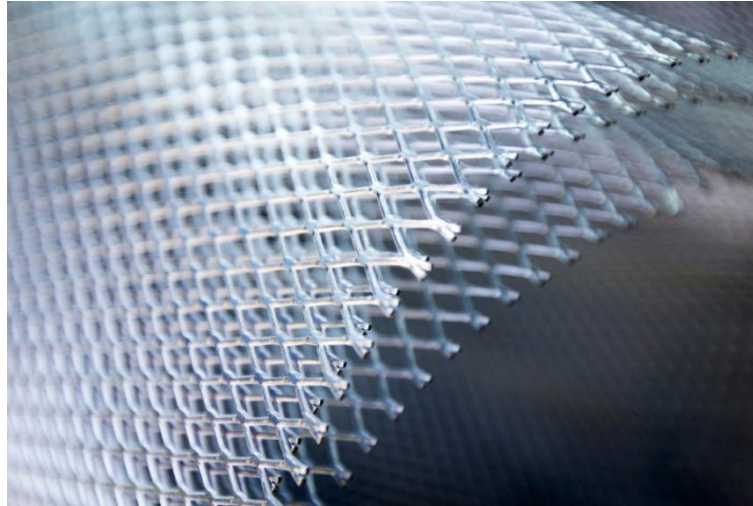
Figure 4 Tuyau PEX-A



Un rouleau de tuyau de type PEX-A (Poly-Ethylene cross-linked ("X"), type A). Source : OPAL SYSTEMS

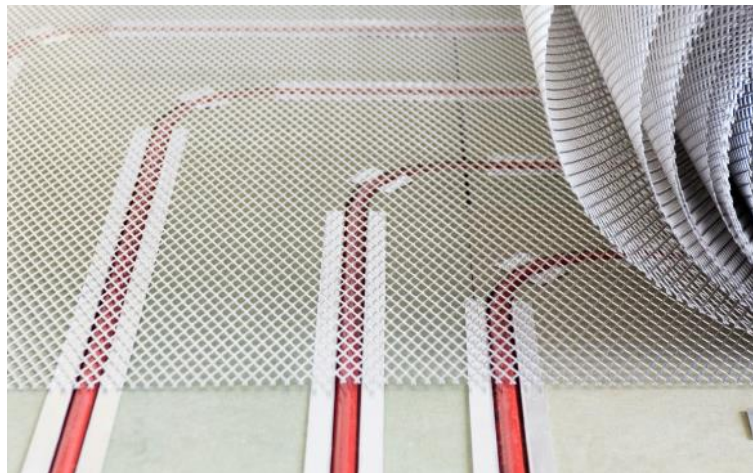
Enfin, un grillage métallique en aluminium (Figure 5) est agrafé sur toute la surface. Il permettra une meilleure diffusion de la chaleur.

Figure 5 Grillage aluminium



Le grillage aluminium agrafé sur les panneaux MDF. Source : OPAL SYSTEMS

Figure 6 Pose de grillage aluminium sur les diffuseurs



Grillage aluminium en contact avec les diffuseurs. Source : OPAL SYSTEMS

Le tuyau transfère sa chaleur au diffuseur en aluminium, lui-même en contact avec le grillage (Figure 6). La quantité de chaleur transmise peut être ajustée en interrompant à intervalles réguliers le diffuseur en aluminium sur la longueur souhaitée, notamment dans les endroits où les tuyaux sont très rapprochés (typiquement à la sortie d'un collecteur ou dans un couloir étroit).

Le terme **collecteur** désigne le dispositif qui alimente les tuyaux en eau chaude et récupère l'eau refroidie pour la chauffer à nouveau (Figure 7). Un même tuyau partant et revenant au collecteur est désigné par le terme **boucle**.

Figure 7 Collecteur



Un collecteur et les différentes boucles qui y sont connectées. Source : OPAL SYSTEMS

L'eau venant d'être chauffée sort directement du collecteur. Puisque les débuts des boucles se trouvent les uns à côté des autres, la zone avoisinante serait surchauffée si le diffuseur aluminium était continu. Dans ce genre de situations, le diffuseur est régulièrement interrompu par des espaces afin de diminuer la conduction thermique (Figure 8). Ceci évite la surchauffe et préserve la chaleur pour les portions plus éloignées du tuyau.

Figure 8 Sortie de collecteur (boucles serrées)



Tuyaux en sortie du collecteur. Le diffuseur en aluminium est régulièrement interrompu pour éviter la surchauffe de la zone. Source : OPAL SYSTEMS

1.4 Parcours des tuyaux du système OPAL SYSTEMS

Suivant les pratiques d'OPAL SYSTEMS, le parcours des tuyaux est principalement dicté par les facteurs suivants :

- L'emplacement du collecteur
- Les contraintes physiques (mécaniques et thermiques)
- L'uniformité de la chauffe
- La simplicité de la pose

1.4.1 Emplacement du collecteur

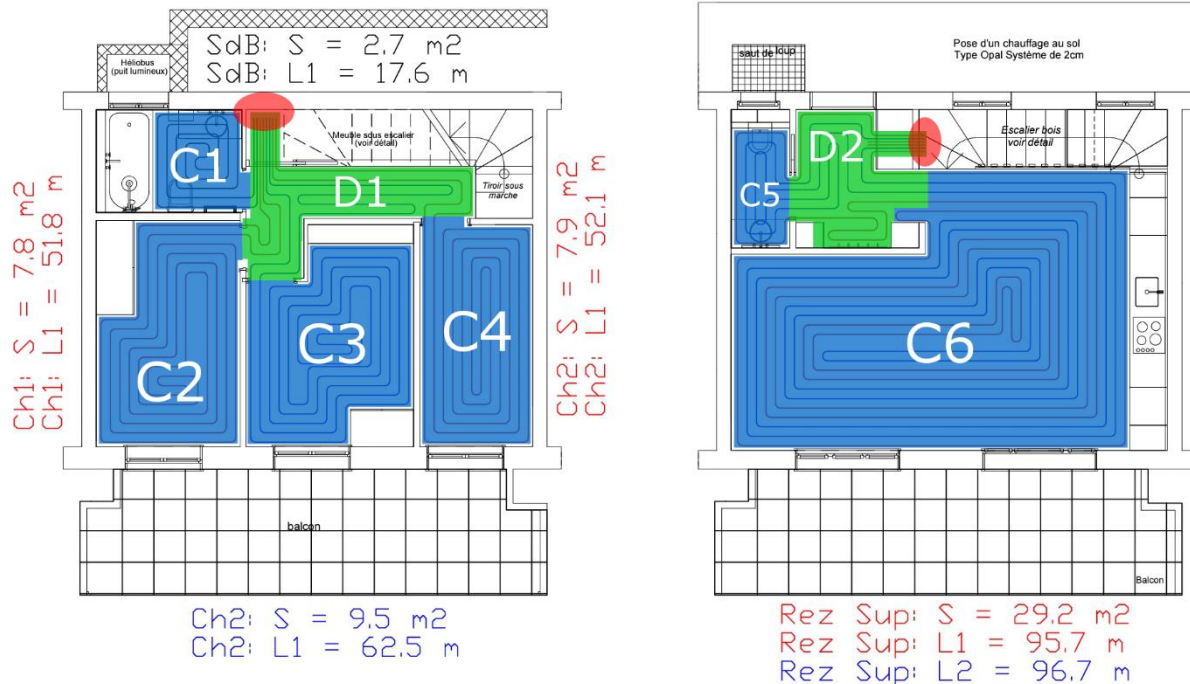
La première des contraintes est celle de l'emplacement du collecteur. Les tuyaux doivent impérativement en partir (pour diffuser la chaleur) et y revenir (pour réchauffer l'eau tempérée par le passage dans la boucle). Les employés d'OPAL SYSTEMS divisent habituellement la disposition du tracé en zones qui peuvent être de deux types :

- **Zone de distribution** : Ce terme désigne la région du sol dévolue à l'acheminement de l'eau jusqu'aux zones à chauffer. Cette zone est partiellement parcourue par les premières parties des différentes boucles.
- **Zones à chauffer** : Ce terme désigne la région du sol que les tuyaux de chauffe doivent parcourir intégralement. En général, il y a une zone à chauffer par pièce et cette zone peut éventuellement être parcourue par plusieurs boucles dans le cas de grands espaces.

Dans le cas où des parties de la zone de distribution n'ont pas été parcourues, les boucles qui ont une longueur le permettant effectuent de courts détours pour finir de couvrir l'espace restant.

Habituellement, une boucle part du collecteur, passe par la zone de distribution pour arriver à la zone à chauffer, puis parcourt la zone à chauffer.

Figure 9 Schéma avec zones de distribution et zones à chauffer



Exemple de plan de chantier. Les boucles vont du collecteur (ellipse rouge) vers les zones à chauffer (bleu) en passant par la zone de distribution (vert). Source (plan) : OPAL SYSTEMS.

La Figure 9 montre un plan de chantier avec une délimitation des zones de distribution (D1 et D2) et des zones à chauffer (C1 à C6). Des annotations figurent autour du plan, donnant les superficies (S) et les longueurs des boucles (L1, L2, L3...) pour chaque pièce.

1.4.2 Contraintes physiques

Comme vu précédemment, le système OPAL SYSTEMS nécessite du matériel spécifique pour sa pose et son fonctionnement. Certaines des pièces utilisées imposent des contraintes mécaniques (rainures des panneaux MDF préfabriqués, rayon de courbure minimal du tuyau PEX-A).

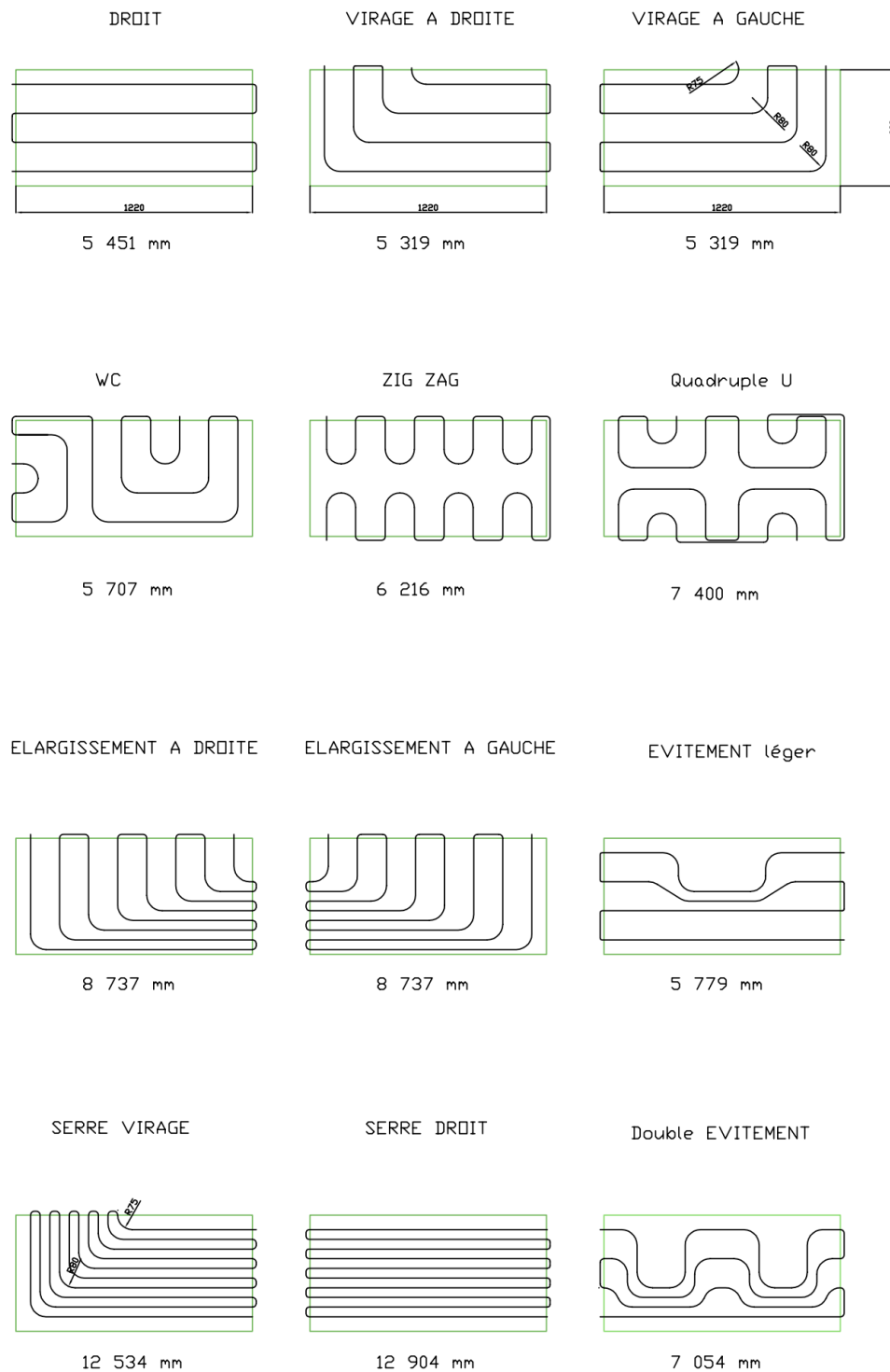
De plus, la perte de chaleur de l'eau tout au long de son parcours doit être prise en compte et constitue une contrainte thermique à respecter pour assurer une chauffe efficace sur l'entièreté du chemin.

1.4.2.1 Contraintes mécaniques

Le tuyau PEX-A utilisé supporte un **rayon de courbure minimum de 7.5 cm**. En-dessous, l'intégrité du tuyau n'est plus garantie et la matière pourrait se fissurer et ne plus être étanche. Cette contrainte est prise en compte par le système de fixation.

Lors de la pose du système, les ouvriers utilisent des panneaux MDF préfabriqués spécialement adaptés aux tuyaux PEX-A. Ces panneaux ont une dimension de 60 par 122 cm et sont fraisés suivant les tracés prédéfinis visibles dans la Figure 10.

Figure 10 Types de panneaux MDF utilisés par OPAL SYSTEMS



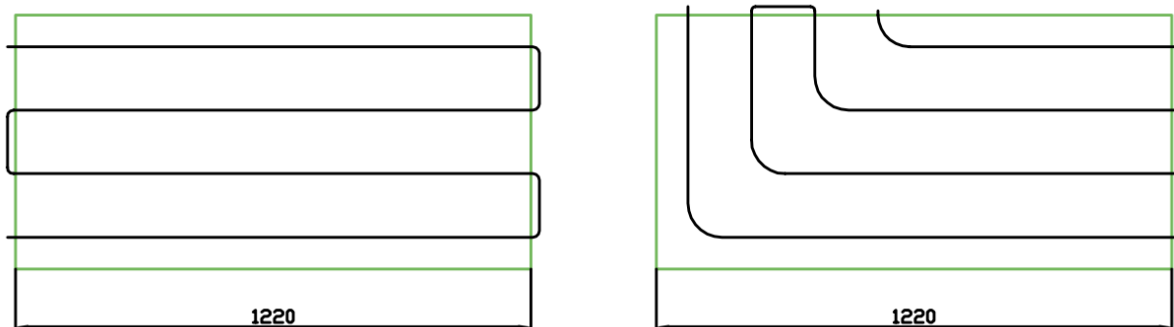
Les différents panneaux MDF utilisés par OPAL SYSTEMS. Le contour des panneaux (122 x 60 cm) est en vert, le tracé de fraisage en noir. Source : OPAL SYSTEMS

Au besoin, les panneaux sont découpés sur place puis combinés pour constituer un tracé adapté à la forme de la zone à chauffer. Il n'est donc pas nécessaire de considérer la dimension des panneaux comme une contrainte en soi.

Les tracés des panneaux adoptent un rayon de courbure de **7.5 cm**. Concernant les espacements entre tuyaux, il y en a deux possibles :

- **15 cm d'entraxe** : utilisé la plupart du temps, il s'agit de l'espacement recommandé par OPAL SYSTEMS pour obtenir une chauffe uniforme.
- **5 cm d'entraxe** : utilisé uniquement si nécessaire, lorsque l'espace à disposition est réduit (évitement d'obstacle, couloir, sortie de collecteur...).

Figure 11 Panneaux MDF droit et virage



Panneaux de type droit et virage. Source : OPAL SYSTEMS

Les panneaux droits et virages sont les plus utilisés ; ce sont eux qui composent le tracé en majorité. Les autres types de panneaux servent dans les sections étroites, les salles de bain ou à l'évitement des obstacles (prise électrique, pilier...). Il faut également noter que le tracé se trouve à **7.5 cm du bord des panneaux** lorsqu'il ne les traverse pas.

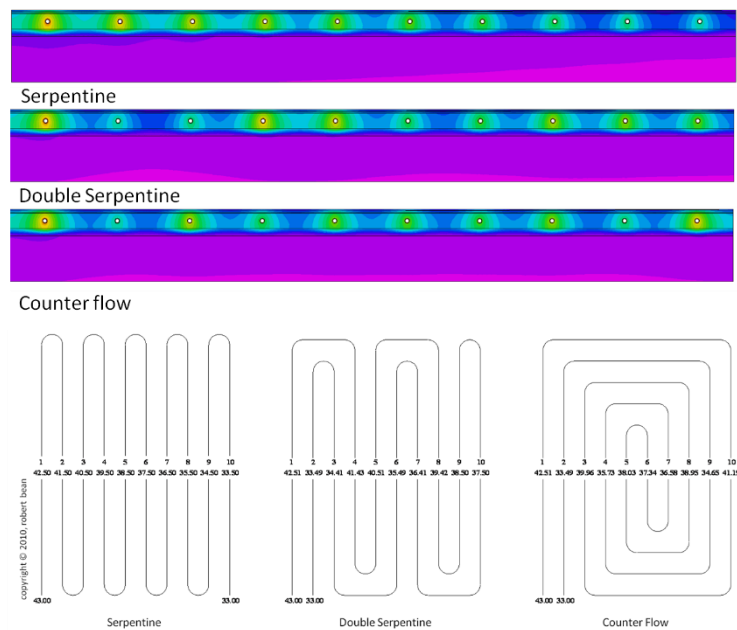
1.4.2.2 Contraintes thermiques

On désigne par le terme boucle un tuyau qui part du collecteur et y revient. Afin de rester efficace, le système requiert de ne pas parcourir de trop longues distances, auquel cas la chaleur de l'eau ne sera diffusée que dans la première partie du parcours. La longueur maximale d'une boucle (comprenant l'aller et le retour) est fixée à environ **100 mètres** et peut couvrir une surface d'approximativement **15 m²**.

1.4.3 Uniformité de la chauffe

La méthode standard utilisée en interne par OPAL SYSTEMS pour le parcours des tuyaux adopte le plus possible un tracé en forme de spirale. Le tracé en serpentin implique généralement qu'un côté d'une pièce est davantage chauffé que l'autre (les sections les plus chaudes du tuyau étant toutes au même endroit). Cette configuration crée une masse d'air chaud d'un côté et une masse d'air moins chaud de l'autre, ce qui provoque un mouvement d'air permanent favorisant les dépôts de poussière.

Figure 12 Simulation physique FlexPDE et Excel des motifs serpent, double serpent et spirale

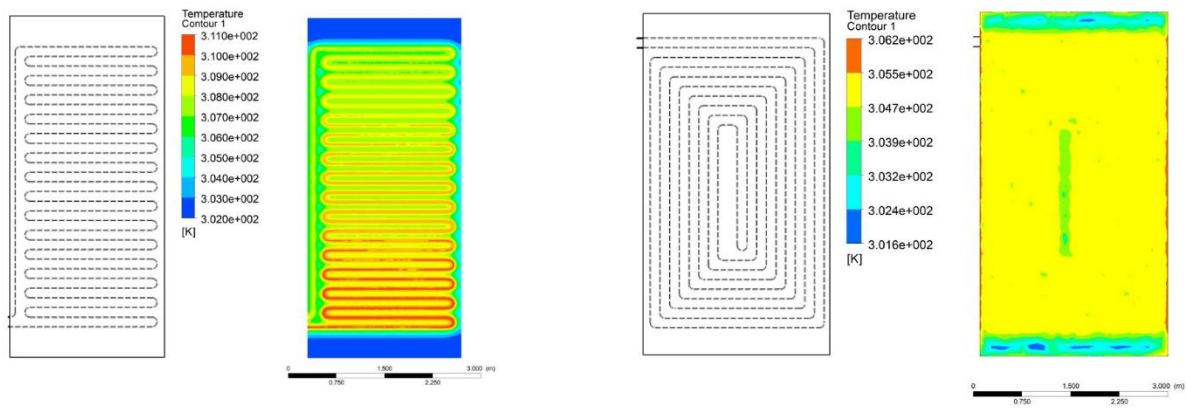


Une simulation physique montrant la diffusion de la chaleur en fonction du tracé utilisé. Les schémas colorés du haut montrent l'intensité de la chaleur en dix points différents suivant une coupe horizontale. La partie basse montre les tracés utilisés : serpent simple, double serpent et « counter flow » (spirale). Source : Robert Bean (happyheating.com)

La simulation physique ci-dessus utilise la méthode des éléments finis. Elle a été réalisée avec les logiciels FlexPDE et Excel et met en évidence les échanges de chaleur obtenus suivant différents tracés. La répartition de chaleur la plus uniforme est obtenue grâce au traçage en « counter flow » (appelé « en spirale » dans ce document). Les tracés en serpent et en double serpent sont moins réguliers en comparaison.

Ce même constat a été fait à l'occasion d'une étude comparant la distribution thermique de différentes dispositions de tuyaux de chauffage au sol (Mishra, Bajracharya, & Bhattarai, 2017).

Figure 13 Distribution thermique des motifs serpent et spirale



Contours et cartes thermiques des motifs en serpentin simple (gauche) et en spirale (droite). Source : (Mishra, Bajracharya, & Bhattarai, 2017)

La Figure 13 met en évidence les différences entre les motifs en serpentin simple et en spirale. On constate que la partie basse de la carte thermique du serpentin produit des températures hautes, puis des températures de plus en plus basses lorsqu'on remonte vers le haut. Dans la zone couverte, la température varie d'environ 3 à 4 °K.

La carte thermique du motif en spirale montre une configuration complètement différente : la température dans la zone couverte est extrêmement régulière et varie d'environ 1 °K. Dans une pièce bien isolée, le motif en spirale est préférable car il assure un meilleur confort.

Il faut cependant préciser que le tracé en serpentin reste utilisé occasionnellement, lorsqu'aucune autre solution n'existe pour couvrir la zone, ou lorsque certaines portions d'une zone sont moins bien isolées et requièrent donc d'être davantage chauffées.

1.4.4 Simplicité de la pose

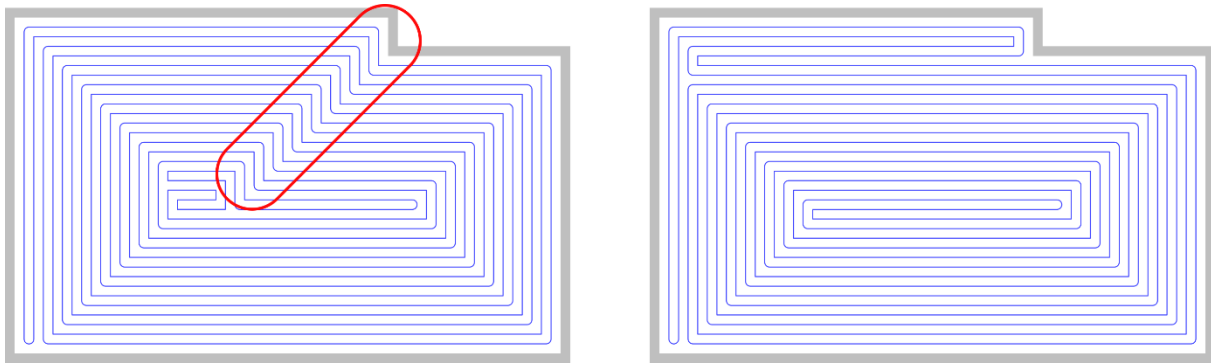
Afin de faciliter la pose, le parcours du tuyau devrait contenir le moins de virages possible. OPAL SYSTEMS utilise deux stratégies pour simplifier le parcours :

- le recours à d'autres motifs que la spirale dans certaines régions du parcours
- l'utilisation d'un tracé faisant progresser plusieurs boucles en parallèle (sur les zones de plus de 15 m²).

1.4.4.1 Motifs de calepinage alternatifs

Sur certaines formes de zones à chauffer, il est acceptable de sacrifier le maintien du motif en spirale pour faciliter la pose des tuyaux.

Figure 14 Simplification de parcours en interrompant le chemin en spirale



Deux parcours possibles pour recouvrir la même zone. À gauche : parcours en spirale, avec contours indésirables entourés en rouge. À droite : parcours hybride.

La Figure 14 montre un exemple de situation dans laquelle le tracé en spirale se révèle être moins avantageux qu'un tracé hybride :

- La variante de gauche suit scrupuleusement un tracé en spirale (excepté au centre), ce qui engendre l'apparition d'une série de doubles contours (entourés en rouge) à faire effectuer au tuyau.
- La variante de droite déroge à la règle de la spirale dans partie nord du tracé et privilégie l'utilisation d'un étroit motif en serpentif. Bien que la zone puisse être légèrement surchauffée, la pose est grandement simplifiée : moins les chemins ont de virages, plus on économise de temps (moins de dimensions à mesurer et de panneaux à découper).

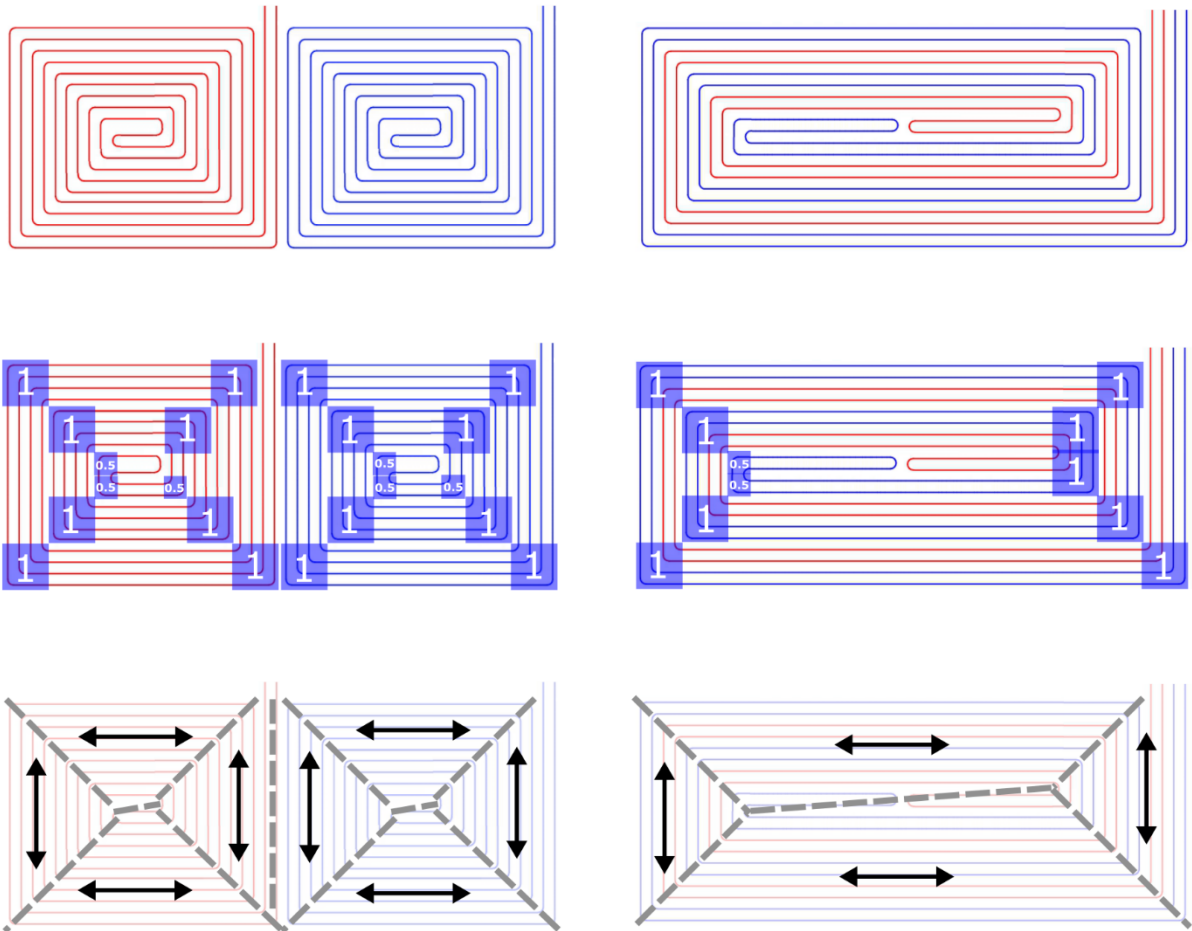
1.4.4.2 Boucles parallèles (double boucle, triple boucle...)

La pose est également simplifiée grâce à l'utilisation d'une stratégie spécifique de calepinage, que nous désignerons par **boucles parallèles** dans ce document. Cette stratégie s'utilise dans le cas de zones à parcourir de plus de 15 m².

La **méthode industrielle classique** consiste, dans ce genre de cas, à subdiviser la zone en sous-zones et à parcourir chacune d'elles avec une seule boucle. Cette méthode produit généralement un tracé avec davantage de contours et de sections droites continues.

La **méthode appliquée par OPAL SYSTEMS** consiste à conserver la zone telle qu'elle est, mais à la faire parcourir simultanément par deux boucles parallèles (ou plus). Cette méthode produit généralement un tracé avec moins de contours et moins de sections droites continues que la méthode précédente.

Figure 15 Comparaison des boucles séparées et des boucles parallèles



Comparaison de deux boucles séparées et de deux boucles parallèles pour la même superficie. De haut en bas : tracés, nombres de panneaux virages, sections droites continues.

La Figure 15 détaille les différences clefs entre les deux méthodes. La ligne du haut montre les tracés. La ligne du milieu montre le nombre de panneaux virages nécessaires pour le tracé (un panneau contient quatre virages). La ligne du bas montre le nombre de sections droites continues.

Tableau 1 Comparaison chiffrée des boucles séparées et des boucles parallèles

	Méthode classique	Méthode d'OPAL SYSTEMS
Nombre de panneaux virages	19	10
Nombre de sections droites continues	8	4

Dans le cas d'une grande zone rectangulaire, deux constats peuvent être faits :

- Le nombre de panneaux virages nécessaires est moins important avec la méthode d'OPAL SYSTEMS. Ceci permet de simplifier le tracé et donc la pose.
- Le nombre de sections droites continues est moins important avec la méthode d'OPAL SYSTEMS. Les panneaux droits étant disposés les uns à la suite des autres,

la longueur totale qu'ils doivent couvrir nécessitera la plupart du temps de découper au moins le dernier panneau pour qu'ils remplissent correctement l'espace concerné. Limiter le nombre de sections droites continues permet donc de diminuer les découpes d'ajustement nécessaires.

Ces avantages sont dus à l'absence de transition entre deux boucles en milieu de zone. Sur une zone rectangulaire, plus le nombre de boucles nécessaires est grand, plus les avantages à utiliser la méthode d'OPAL SYSTEMS s'accroissent.

1.5 Intégration au processus d'entreprise

Le système final devra idéalement s'intégrer au processus interne d'OPAL SYSTEMS. Cette intégration doit se faire :

- **au niveau métier** : où le système s'insère dans le processus, quelles données il reçoit, quel traitement il réalise, quelles données il transmet...
- **au niveau technique** : dans quel contexte le système va-t-il s'exécuter, quel format de données reçoit-il en entrée, quel format transmet-il en sortie...

Tout au long de ce travail, nous devons constamment prendre en compte ces deux aspects, chacun ayant des contraintes spécifiques.

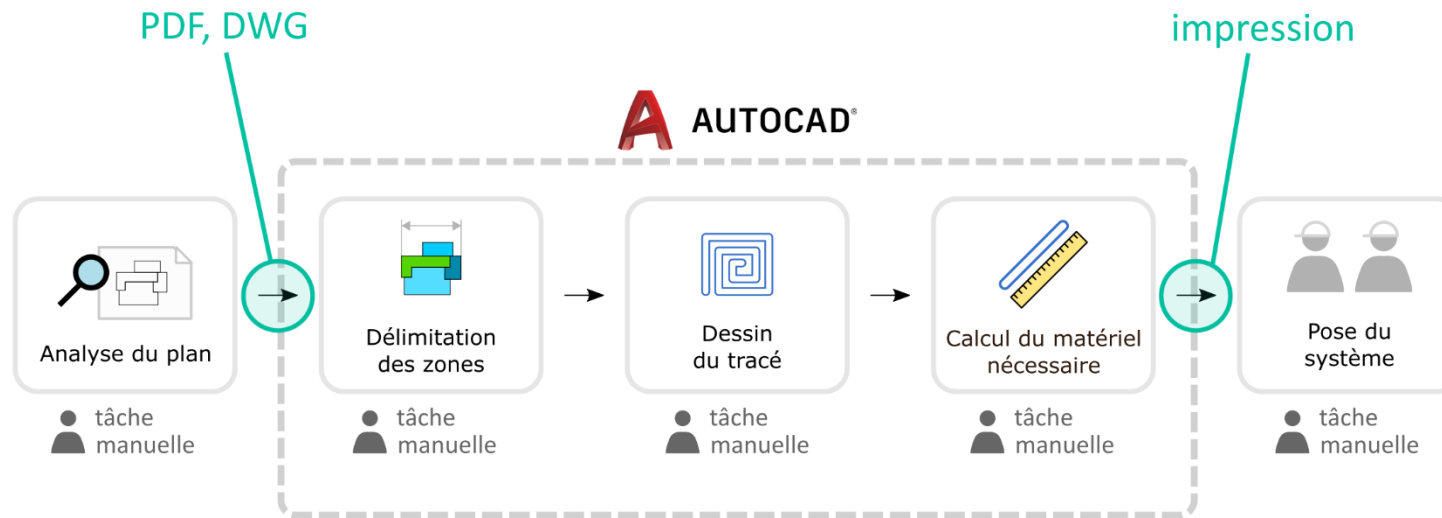
1.5.1 Intégration métier – Traitement à réaliser

Le processus actuel d'OPAL SYSTEMS implique l'analyse du plan du chantier, l'annotation du plan (zones et chemins des tuyaux), le calcul du matériel nécessaire puis la transmission du plan annoté aux ouvriers afin qu'ils puissent s'y référer durant la pose.

L'annotation du plan comprend les éléments suivants :

- Les **contours des zones** pour pouvoir calculer les superficies avec AutoCAD et organiser le tracé,
- les **superficies des zones** pour savoir combien de boucles et de grillage aluminium prévoir,
- les **chemins suivis par les boucles** pour savoir combien de panneaux MDF prévoir et que les ouvriers sachent comment les positionner,
- les **longueurs de tuyaux nécessaires pour chaque boucle** pour savoir quelles longueurs de diffuseur et de tuyau prévoir.

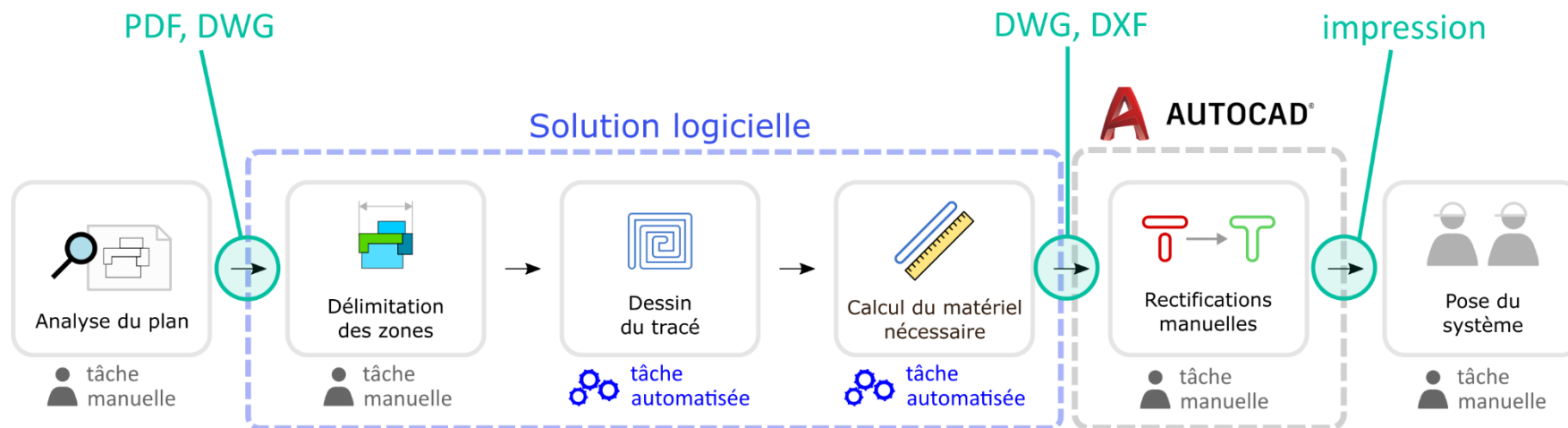
Figure 16 Processus actuel suivi par OPAL SYSTEMS



Processus actuel suivi par OPAL SYSTEMS. Les formats de données sont représentés en turquoise. Toutes les tâches du processus sont manuelles.

La Figure 16 donne un aperçu du processus actuel. Le **traçage des chemins des tuyaux** ainsi que le **calcul du matériel nécessaire** sont réalisés manuellement. Ces deux étapes prennent un temps non négligeable : elles peuvent être répétitives, fastidieuses et sont donc une potentielle source d'erreurs. Par conséquent, ce sont celles qui pourraient le plus bénéficier d'une automatisation.

Figure 17 Nouveau processus envisagé pour OPAL SYSTEMS



Le nouveau processus envisagé, après automatisation. AutoCAD reste nécessaire pour corriger le résultat généré.

La Figure 17 montre le processus après automatisation. Une étape supplémentaire consistant à effectuer des **rectifications manuelles** du tracé a été ajoutée au processus. Cependant, le **dessin du tracé** et le **calcul du matériel** étant désormais automatisés, un gain de temps peut être envisagé.

La nature exacte de la solution logicielle sera déterminée dans la section de ce document dévolue à l'implémentation.

1.5.2 Intégration technique – Formats de données

Exécuter entièrement l'ancien ou le nouveau processus requiert d'effectuer plusieurs traitements sur les données, mais également de convertir leur format de façon appropriée. La Figure 16 et la Figure 17 renseignent sur les formats de données utilisés dans l'ancien et le nouveau processus envisagé (voir annotations turquoise). Nous examinons ici cette question plus en détails.

1.5.2.1 Format d'entrée des processus

Les deux processus débutent avec l'analyse du plan de chantier remis par le client. Le plan peut être transmis au format DWG ou PDF :

- Le **format DWG** (DraWinG) contient le plan sous format vectoriel, à l'échelle appropriée pour AutoCAD, le DWG étant le format natif de ce logiciel.
- Le **format PDF** (Portable Document Format) peut contenir des données vectorielles (segments, arcs de cercle...) ou matricielles (images). Dans les deux cas, les données devront être mise à l'échelle pour un calcul correct des superficies des zones.

1.5.2.2 Formats intermédiaires

Les étapes de traitement de l'ancien processus se déroulant exclusivement dans AutoCAD, il n'y a pas de problématique concernant le format des données.

Le nouveau processus requiert que la solution logicielle puisse produire un résultat dans un format exploitable par AutoCAD, dans le but de permettre des rectifications manuelles du tracé. Le DWG est bien sûr une possibilité, mais le **DXF** (Drawing Exchange Format), un format conçu pour permettre une compatibilité entre AutoCAD et des applications tierces, peut également être envisagé. Plus largement, tout format vectoriel pouvant être importé dans AutoCAD peut être envisagé. Le DWG et le DXF sont cependant les formats officiels, ce qui conduirait à les privilégier.

1.5.2.3 Format de sortie des processus

La fin des deux processus consiste à transmettre les données aux ouvriers responsables de la pose du système, afin qu'ils disposent d'un plan auquel se référer. La seule exigence est que le plan puisse être visualisé. AutoCAD permettant l'impression du plan, rien de particulier ne doit être fait concernant l'étape finale. L'impression peut être réalisée soit sur papier (support physique facilement transmissible) ou dans un fichier PDF (consultation sur smartphone).

1.5.3 Estimation du matériel nécessaire

Une fois le parcours des tuyaux obtenu, le matériel nécessaire pour la pose du système doit être estimé. L'algorithme devra donc permettre de calculer les valeurs suivantes :

- Le nombre de **panneaux droits** nécessaires
- Le nombre de **panneaux virages** nécessaires
- La **longueur de diffuseur** nécessaire (en incluant les sections droites et les virages, sachant qu'un virage de 90° utilise deux morceaux de 1.5 cm de diffuseur)
- La **longueur totale des tuyaux** nécessaires pour chaque boucle
- L'**aire totale des zones** en m² (permet de déduire la quantité de grillage aluminium nécessaire)

1.6 Hypothèse de travail

L'objet de notre recherche est d'automatiser autant que possible le traçage du parcours des tuyaux.

Considérant ce contexte, nous faisons l'hypothèse que le traçage du parcours des tuyaux et le calcul du matériel nécessaire assisté d'un algorithme est plus rapide qu'un traçage exclusivement manuel. Si cette hypothèse se vérifie, le temps requis pour délimiter les zones, lancer l'algorithme, rectifier manuellement le tracé et afficher la liste de matériel nécessaire devrait être inférieur au temps nécessaire à un traçage et à un calcul de matériel exclusivement manuel. Le calcul automatisé du matériel nécessaire devra produire des résultats numériques exploitables (en-dessous d'une marge d'erreur acceptable).

1.7 Limites

Les aspects de la problématique étant nombreux et pouvant chacun impliquer des recherches poussées, nous avons choisi de concentrer notre travail sur les cas les plus couramment rencontrés dans la pratique.

1.7.1 Intégration du système et calcul du matériel

L'intégration au processus d'entreprise se limitera à la réalisation d'un prototype faisant usage de l'algorithme mis au point pour le remplissage des zones à chauffer. Les fonctionnalités seront les suivantes :

- Mise à l'échelle du plan
- Saisie de polygones
- Utilisation de l'algorithme dans les polygones saisis
- Calcul du matériel nécessaire

- Export des tracés obtenus vers AutoCAD

1.7.2 Zones à chauffer

La réalisation de notre travail se restreindra aux contraintes suivantes :

- La marge entre le bord de la zone et le tracé des tuyaux est de 7.5 cm
- Le rayon de courbure du tuyau est fixé en toute situation à 7.5 cm
- La limite maximale de 100 mètres des boucles ne sera pas vérifiée (mais la longueur de boucle sera calculée)
- L'espacement idéal entre les tuyaux est de 15 cm
- Intégration au processus d'entreprise : DWG ou PDF en entrée, format compatible AutoCAD en sortie pour rectifications manuelles
- Les obstacles à l'intérieur d'une zone à chauffer ne sont pas pris en compte.
- Les boucles parallèles ne sont pas implémentées.

Le respect de ces contraintes garantit que le tracé obtenu pourra être construit à l'aide des panneaux MDF rainurés utilisés par OPAL SYSTEMS.

1.7.3 Zones de distribution

La problématique des zones de distribution est différente de celle des zones à chauffer. Plutôt qu'une couverture exhaustive d'une surface donnée, la zone de distribution est surtout concernée par le problème de l'acheminement.

Dans la plupart des cas, les boucles partent du collecteur et parviennent jusqu'à la périphérie d'une zone à chauffer. Cette partie du parcours dévolue à l'acheminement doit satisfaire diverses contraintes :

- Raccorder le collecteur à la zone à chauffer
- Être la plus courte possible pour éviter de surchauffer la zone de distribution et préserver le maximum de longueur et d'efficacité pour la zone à chauffer
- Éviter les obstacles (bords de zone, tuyau (y compris espacement de 15 cm)...))
- Ne pas empêcher l'acheminement vers d'autres zones à chauffer

L'automatisation du traçage des zones de distribution requerrait la conception d'un algorithme spécifique que nous n'aborderons pas dans ce travail.

Les tracés des zones de distribution peuvent cependant être générés au moyen de l'algorithme des zones à chauffer, en dessinant des polygones allant du collecteur jusqu'aux zones.

2 État de l'art

Enfin d'introduction, nous avons posé les limites de notre travail et déterminé clairement les contraintes à prendre en compte. Nous avons notamment relevé que l'automatisation à réaliser devait prendre en compte l'aspect métier (lié à la problématique du parcours des tuyaux) et l'aspect technique (lié à l'implémentation et aux formats de données).

Nous examinerons l'état de l'art concernant la génération du parcours des tuyaux et le calcul du matériel. Nous tenterons de déterminer quelles solutions logicielles existent et, le cas échéant, quels algorithmes peuvent être utilisés pour répondre aux besoins précités.

Nous examinerons également les possibilités d'exploitation des formats de fichiers DWG et DXF. Nous viserons à déterminer quelles informations sont contenues dans ces formats et comment ces informations peuvent éventuellement être utilisées.

Considérant la nature de la problématique, certaines sources d'informations utilisées sont davantage industrielles qu'académiques. L'association de ces deux secteurs permet d'obtenir à la fois une bonne vue d'ensemble théorique et pratique. Les sources académiques assureront une validité théorique, tandis que l'industrie procurera un point de vue pragmatique, issu d'une approche plus empirique et expérimentale.

2.1 Logiciels industriels pour le chauffage au sol

L'industrie propose plusieurs logiciels spécifiquement conçus pour assister la mise en place de systèmes de chauffage au sol hydrauliques. En général, ils fournissent les fonctionnalités suivantes :

- Estimation du matériel nécessaire pour la pose du système
- Analyse thermique (propagation et perte de chaleur) afin de dimensionner correctement le système
- Calepinage des tuyaux à placer au sol (circuits en serpentins et spirales)

Certains outils plus simples estiment approximativement le matériel requis en fonction de la superficie et produisent une liste de matériel pour des devis sans présenter de tracé à l'utilisateur. D'autres permettent une analyse plus avancée et permettent de connecter plusieurs tracés entre eux, chacun pouvant avoir son propre algorithme de remplissage (serpentin ou spirale).

Pour qu'un logiciel soit pertinent dans notre cas d'utilisation, il doit satisfaire les critères suivants :

- Le logiciel doit permettre de générer un motif en serpent
- Le logiciel doit permettre de générer un motif en spirale
- Le logiciel doit permettre l'import d'une image ou d'un PDF
- Le logiciel doit permettre l'import de fichiers DWG
- Le logiciel doit permettre l'export en format DWG ou DXF
- Le collecteur doit être modélisé
- La superficie des zones doit pouvoir être obtenue afin de déterminer la quantité de grillage aluminium à utiliser
- La longueur de tuyau doit pouvoir être obtenue afin de savoir quelle longueur prévoir pour le chantier
- Les limites de capacité du système OPAL SYSTEMS doivent être prises en compte par le logiciel, essentiellement la longueur maximum d'une boucle (100 mètres). Le logiciel devrait fournir un retour à l'utilisateur si cette limite est dépassée.
- L'espacement entre deux tuyaux devrait être réglable afin de pouvoir respecter les 15 cm préconisés par OPAL SYSTEMS
- La marge depuis les murs devrait être réglable afin de prendre en compte la distance de 7.5 cm entre le bord d'un panneau MDF et la rainure la plus proche.
- Le rayon de courbure du tuyau devrait être réglable afin de prendre en compte le rayon de courbure minimal du tuyau PEX-A utilisé par OPAL SYSTEMS.

Les principaux logiciels existants sont les suivants :

- **LoopCAD** édité par Avenir Software Inc. (Canada)
- **Uponor MagiCAD Plugin** édité par Uponor Corporation (Finlande). Il s'agit d'un plugin de MagiCAD (MagiCAD Group (Finlande)), lui-même étant un plugin AutoCAD
- **TGA Heating 3D PLUS** édité par ETU Software GmbH (Allemagne)
- **RAUCAD** édité par REHAU (Allemagne)
- **HT2000-CAE** édité par Willms GmbH (Allemagne)
- **HeatingDesign** édité par TiSoft (Grèce)

Le Tableau 2 liste ces outils et renseigne sur la disponibilité des fonctionnalités nécessaires.

Tableau 2 Comparaison de logiciels industriels pour le chauffage au sol hydraulique

Logiciel	Motif serpentín	Motif spirale	Import image PDF ou	Import DWG	Export to DWG/DXF	Collecteur modélisé	Superficie	Longueur tuyau	Prise en compte de la capacité du système	Espacement entre tuyaux réglable	Marge depuis murs réglable	Rayon de courbure réglable
LoopCAD	oui	oui	oui	oui	oui	oui	indéterminé	oui	oui (via <i>Target length</i> et <i>Maximum length</i>)	oui	oui	indéterminé
Uponor MagiCAD Plugin	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui (via l'outil <i>Mesure</i>)	oui (via <i>Circuit length</i> ou <i>Circuit area</i>)	oui (via <i>Circuit length</i> ou <i>Circuit area</i>)	oui	oui	indéterminé
TGA Heating 3D PLUS	oui	oui	indéterminé	indéterminé	indéterminé	indéterminé	indéterminé	indéterminé	indéterminé	indéterminé	indéterminé	indéterminé
RAUCAD	indéterminé	oui	indéterminé	indéterminé	indéterminé	indéterminé	indéterminé	indéterminé	indéterminé	indéterminé	indéterminé	indéterminé
HT2000-CAE	oui	oui	indéterminé	indéterminé	indéterminé	indéterminé	indéterminé	indéterminé	indéterminé	indéterminé	indéterminé	indéterminé
HeatingDesign	oui	oui	indéterminé	oui	oui	oui	oui	oui (via la valeur <i>LHK</i>)	oui (via <i>Pipe length</i> dans <i>Max. permitted values</i>)	oui	oui	oui

Adapté de (Avenir Software Inc., s.d.), (Uponor Corporation, s.d.), (ETU Software GmbH, s.d.), (REHAU, s.d.), (Willms GmbH, s.d.), (TiSoft, s.d.)

Le support des fonctionnalités a été déterminé grâce aux manuels utilisateur et vidéos de démonstrations publiées pour chacun de ces outils. Il faut ici préciser que les logiciels **TGA Heating 3D PLUS**, **RAUCAD** et **HT2000-CAE** donnent moins facilement accès aux informations nécessaires à leur évaluation, ce qui explique l'abondance d'informations indéterminées.

Nous pouvons constater que les logiciels existants fournissent des fonctionnalités très intéressantes pour le cas de OPAL SYSTEMS. En règle générale, le tracé du parcours peut être contrôlé très en finesse ; plusieurs zones peuvent être ajoutées au plan et reliées entre elles, chacune ayant son propre type de parcours (serpentin, spirale...). La perte de chaleur étant prise en compte, la longueur du tuyau peut être limitée et calculée. L'aire des zones est également directement calculée par les logiciels.

Cependant, le calcul du matériel nécessaire inclut également le nombre de panneaux droits et virages ainsi que la longueur de diffuseur. Calculer ces valeurs nécessite de connaître le nombre de virages ou au moins la longueur totale des virages, une option qui n'est apparemment pas présente dans les logiciels examinés.

En conclusion, les logiciels industriels de chauffage au sol examinés répondent presque entièrement aux besoins d'OPAL SYSTEMS. Ils intègrent notamment le traçage en spirale et la limitation de la longueur des boucles. Malheureusement, le matériel de OPAL SYSTEMS étant très spécifique, ces outils n'offrent pas la possibilité de calculer le matériel nécessaire.

2.2 Algorithmes de traçage

Nous avons pu constater que les logiciels industriels ne permettraient pas à OPAL SYSTEMS de facilement quantifier le matériel nécessaire pour la pose du système de chauffage.

Nous allons donc déterminer quelles solutions algorithmiques existent. Ceci pourrait éventuellement nous permettre d'implémenter la description théorique d'un algorithme existant et d'incorporer, si nécessaire, un moyen de calculer automatiquement le matériel nécessaire à partir des résultats retournés.

2.2.1 Algorithmes utilisés par les logiciels industriels

Il a été établi plus haut que les logiciels industriels ne répondent pas au besoin du calcul du matériel nécessaire. Cependant, ces logiciels permettent de générer automatiquement les chemins des tuyaux de chauffe. Il est donc possible que les algorithmes utilisés par ces programmes soient documentés par l'éditeur du logiciel.

Il s'avère cependant que les logiciels examinés sont tous propriétaires. Les algorithmes utilisés pour la génération des tracés ne sont pas publics et ne sont au mieux que partiellement documentés dans les manuels utilisateur. Le manuel utilisateur du logiciel HeatingDesign a constitué la meilleure source d'information. Il ne décrit cependant que très insuffisamment les algorithmes utilisés et ne permettra donc pas de réaliser une implémentation.

Figure 18 Illustration de l'algorithme en spirale de HeatingDesign

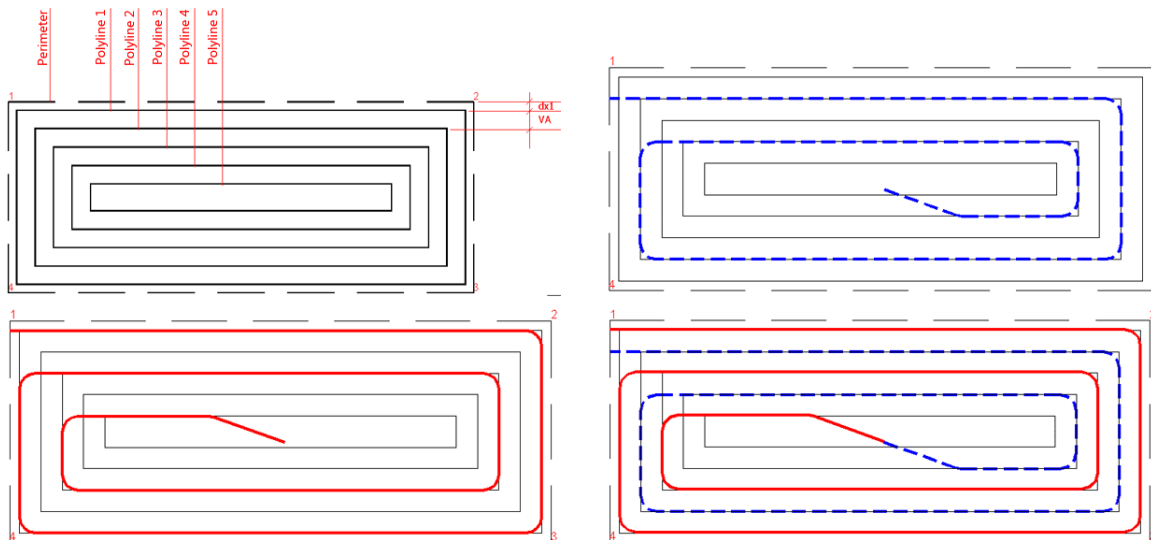


Illustration de l'algorithme « escargot » (snail algorithm, autre nom pour le motif spirale) utilisé dans HeatingDesign. Source : (TiSoft, s.d.)

La Figure 18 est une illustration explicative de l'algorithme utilisé dans HeatingDesign pour la génération de tracés en spirales dans une zone donnée. Nous pouvons constater l'utilisation de polygones de décalage intérieur pour construire le tracé final.

HeatingDesign documente également la génération de tracés en serpentins :

Figure 19 Illustration de l'algorithme en serpentins de HeatingDesign

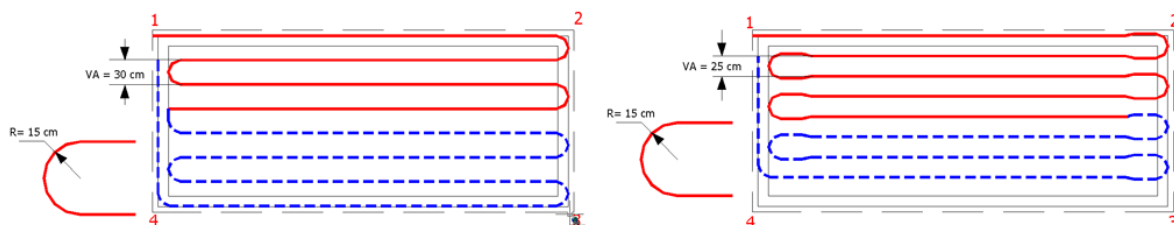


Illustration de l'algorithme « meander » (méandre, autre nom du serpentins en anglais) utilisé dans HeatingDesign. Source : (TiSoft, s.d.)

Le code source des logiciels n'étant pas accessible et leurs algorithmes n'étant pas exhaustivement documentés, nous devons examiner d'autres options.

2.2.2 Algorithmes appliqués aux systèmes de chauffage

Nous avons pu constater que les éditeurs des logiciels industriels examinés ne donnent pas d'informations utilisables sur les algorithmes utilisés. Il est cependant possible que des algorithmes liés aux systèmes de chauffage au sol aient été documentés dans le milieu académique.

Il s'avère que les systèmes de chauffage au sol ont fait l'objet de nombreux travaux de recherche. Plus spécifiquement, des algorithmes explicitement conçus pour les systèmes de chauffage au sol hydrauliques existent.

Cependant, ces travaux explorent des domaines tels que la simulation physique de chauffage au sol hydraulique (Karlsson, Thermal system analysis of embedded building integrated heating, 2006) et (Karlsson, Thermal Modelling of Water-Based Floor Heating Systems, 2010), le calcul du transfert de chaleur (Chapman & Shultz, 2002), la gestion de pompe à chaleur (Lee, 2013), la réduction des pertes de chaleur des réseaux de canalisations (Svendsen, 2012) ou l'optimisation des coûts de maintenance (Sanaye, Mahmoudimehr, & Aynechi, 2012).

Dans leur ensemble, ces différentes recherches abordent les problèmes d'optimisation énergétique et financière des systèmes de chauffage. Aucune n'a pour objet les problèmes de calepinage.

2.2.3 Travaux liés au parcours des tuyaux

Aucune description formelle d'algorithme n'ayant été trouvée, nous nous sommes orientés vers les travaux mentionnant ou ayant pour objet les types de parcours de tuyau utilisés par les chauffages au sol hydraulique. Bien que cela soit peu probable, il aurait été possible que des travaux abordant le calepinage existent mais ne contiennent pas le mot-clef *algorithme*.

Néanmoins, parmi les études consultées, la seule abordant les types de parcours (en l'occurrence le serpentin et la spirale) était celle citée en introduction de ce document (Mishra, Bajracharya, & Bhattarai, 2017). Là encore, seul l'aspect thermique était abordé.

2.2.4 Algorithmes de génération de chemin

Nous avons donc établi que les logiciels industriels ne décrivaient pas leurs méthodes de calepinage automatisé. Nous avons également constaté que les travaux de recherche consultés concernant les systèmes de chauffage se concentraient sur d'autres problèmes que celui du calepinage. Cette absence de description formelle d'un algorithme dédié à la réalisation automatique d'un plan de calepinage nous a conduit à examiner la situation sous un angle plus abstrait.

Nous avons choisi d'approcher le problème sous son angle le plus intuitif, c'est-à-dire sous sa représentation dans un plan géométrique en deux dimensions. Dans cette perspective, les zones de distribution et les zones à chauffer sont vues comme des polygones délimitant des régions du plan. Le traçage des zones à chauffer consiste donc désormais à remplir un polygone avec un tracé en forme de spirale.

Cette approche plus générale nous a permis de considérer des algorithmes liés à la géométrie ou à d'autres domaines de recherche. Nous avons alors pu constater que les algorithmes de génération de chemin outil semblaient dignes d'intérêt.

Les machines CNC (Computer Numerical Control) sont des machines-outils à commande numérique. Elles sont utilisées pour usiner des pièces sous différents angles avec différents instruments. Certaines machines opèrent par fraisage, en creusant la matière avec différents types de tiges. Ce genre de machine requiert un pilotage précis et utilise des algorithmes de génération de chemin outil (*tool path generation algorithms*) dont le rôle est de générer un chemin que l'outil va suivre afin de fraiser correctement la matière.

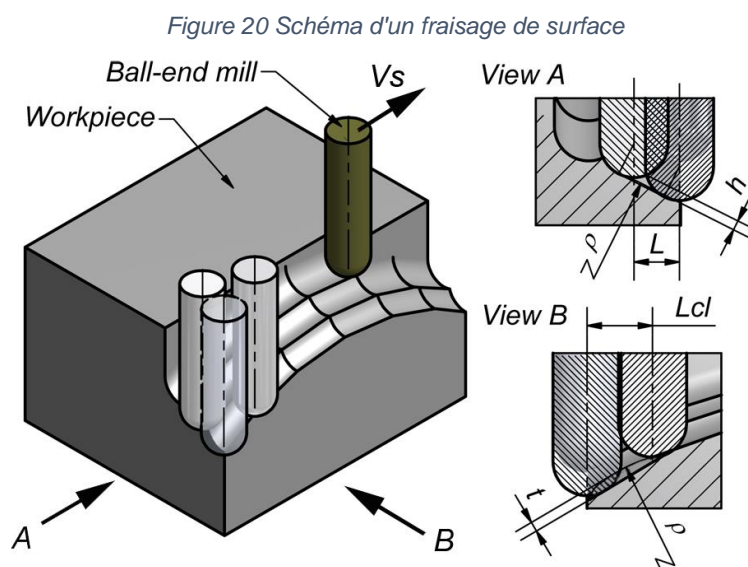


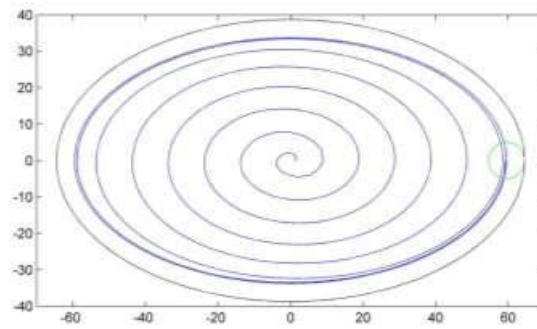
Schéma d'un fraisage de surface (Mladenovic, Tanovic, & Ehmann, 2014)

Ces algorithmes existent en plusieurs variantes. Certains sont conçus pour le fraisage de surfaces et opèrent dans un espace à trois dimensions, ce qui ne correspond pas à notre cas. D'autres algorithmes opèrent sur un même plan de profondeur, leur fonctionnement étant décrit dans un plan 2D.

Dans notre cas, les algorithmes 2D présentent un certain intérêt car, dans le cas d'un fraisage 2D tout comme dans le cas d'une zone à chauffer par chauffage au sol, un chemin couvrant l'entièreté de la surface doit être généré. Ce chemin est de plus parcouru par une entité ayant une certaine épaisseur : une tige de fraisage dans un cas, des tuyaux de chauffage avec un espacement dans l'autre.

Néanmoins, il est important de constater que certaines contraintes ne soient pas identiques. Par exemple, rien n'empêche un outil de fraisage de repasser plus d'une fois au même endroit, de suivre un chemin irrégulier ou encore de faire varier l'espacement entre deux trajets.

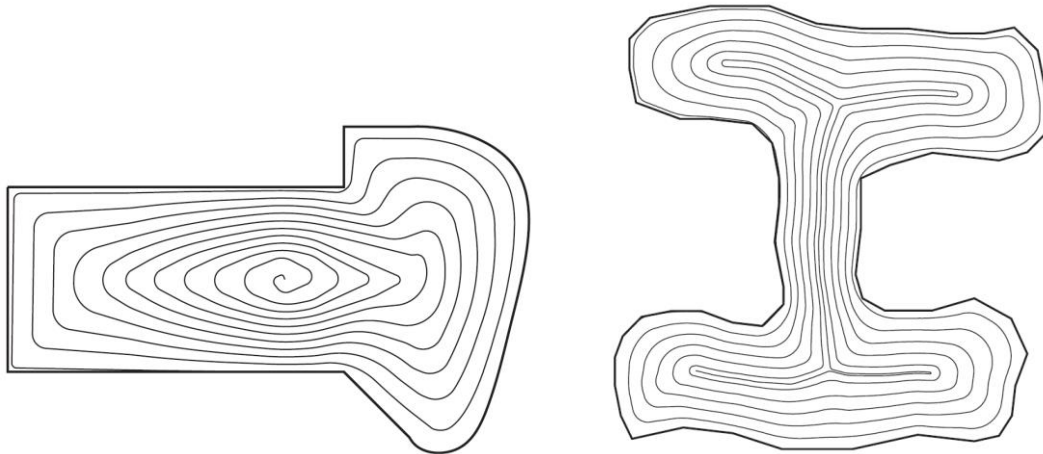
Figure 21 Génération de chemin en spirale sur poche elliptique



Chemin en spirale elliptique (Dharmendra & Lalwani, 2015)

Ceci s'observe chez (Dharmendra & Lalwani, 2015), qui obtiennent un chemin en spirale mais uniquement pour les poches elliptiques (Figure 21) et avec une largeur variable entre les différentes parties du chemin.

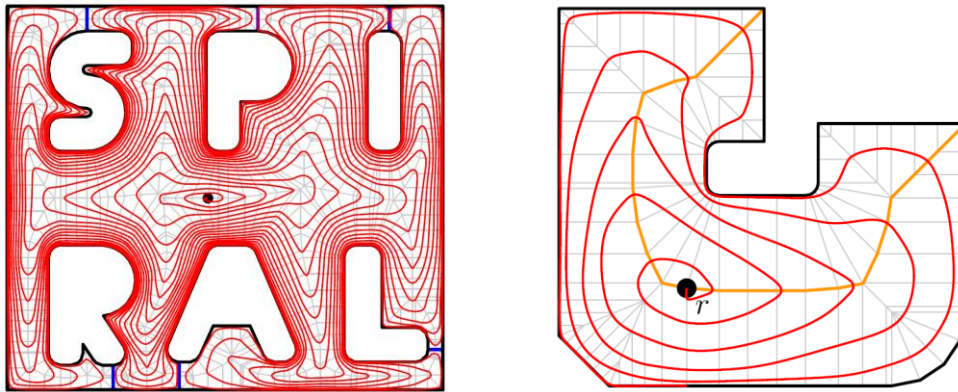
Figure 22 Chemins en spirale à espacements variables



Chemin en spirale à largeur variable généré pour le fraisage à haute vitesse (Abrahamsen, 2019)

(Abrahamsen, 2019) propose un chemin optimisé pour le machinage à haute vitesse (Figure 22) mais adoptant également une largeur irrégulière, tout comme (Held & de Lorenzo, 2018) et (Zhou, Zhao, Li, & Xia, 2016).

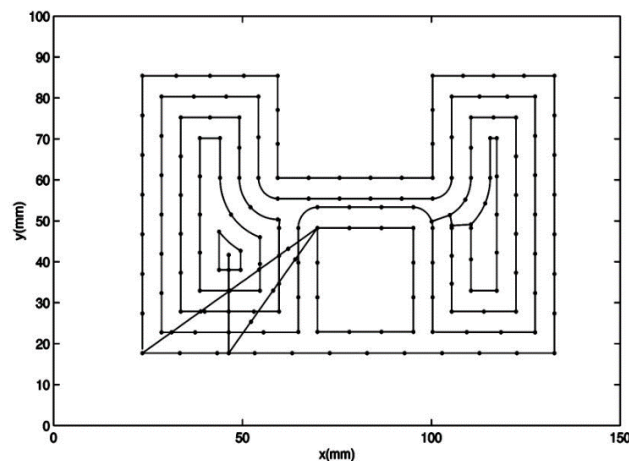
Figure 23 Autre exemple de spirales à espacements variables



Chemins en spirale à largeur variable (Held & de Lorenzo, 2018)

(Wang, Jang, & Stori, 2005) proposent un chemin modifié itérativement pour éviter les accélérations de l'outil de fraisage. Le chemin de l'itération initiale (Figure 24) est généré par des contours concentriques. La forme de spirale n'est pas présente mais la régularité de l'espacement se rapproche d'un résultat pouvant nous intéresser.

Figure 24 Chemin non spirale à largeur régulière



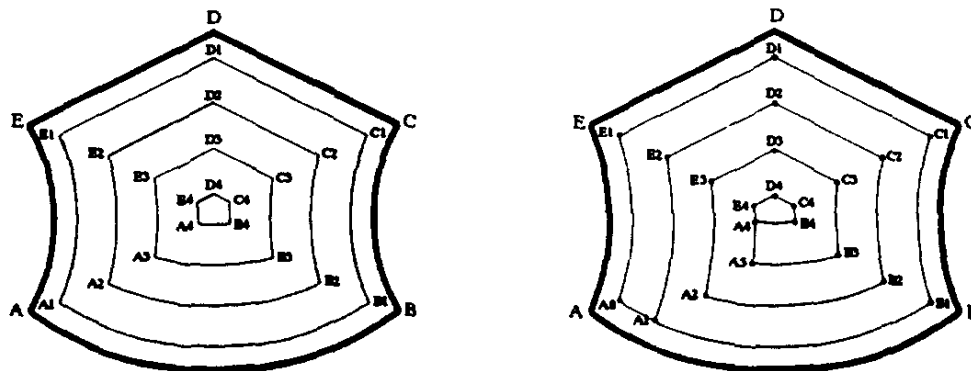
Un exemple de chemin ne suivant pas une spirale mais avec une largeur régulière (Wang, Jang, & Stori, 2005)

Même lorsqu'aucune autre contrainte que la couverture intégrale d'une zone n'influence le chemin généré, la plupart des algorithmes examinés génèrent des chemins trop irréguliers pour pouvoir servir dans notre cas. Les contraintes physiques des panneaux MDF impose de respecter exactement les espacements prescrits et ne tolèrent aucune dérogation à cette règle. Il existe cependant des travaux associant les deux propriétés requises dans notre situation : le maintien d'un écart constant et le parcours en spirale.

(Manuel, Liang, & Kolahan, 1996) présentent un algorithme permettant de générer le chemin de fraisage de poches (*pockets*) convexes (une poche pouvant être approximée par un polygone). Les opérations réalisées fonctionnent au moyen de géométrie analytique, chaque côté d'une poche convexe pouvant être un arc de cercle ou une ligne droite. Les côtés de la

poche sont poussés vers l'intérieur (ils sont alors appelés *offset segments*, avec la distinction des *line segments* (segments de droites) et *arc segments* (segments d'arcs)), d'une distance appropriée pour le fraisage en prenant en compte l'épaisseur de l'outil et un ajustement nécessaire pour éviter de sous-découper la matière aux angles. Le décalage vers l'intérieur est réalisé plusieurs fois et les contours obtenus sont ensuite combinés (Figure 25) pour réaliser une spirale et ainsi créer un chemin outil capable de générer la poche convexe en question.

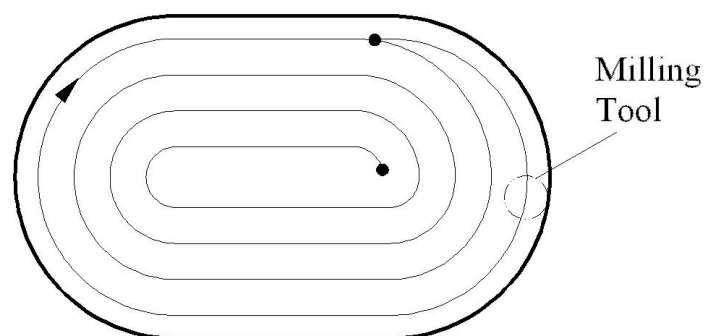
Figure 25 Combinaison de décalages intérieurs d'un contour pour former un chemin en spirale



Les décalages intérieurs successifs (gauche) peuvent être combinés en un seul chemin en spirale (droite)

(Chen & McMains, 2005) examine la même problématique et utilise la même idée de décalage des segments vers l'intérieur, avec certaines différences. L'algorithme proposé fonctionne non pas sur des poches mais sur des polygones, les éventuels arcs devant être approximatés par une suite de segments de droites. En revanche, l'algorithme fonctionne sur des polygones convexes et concaves. Il faut cependant noter que le résultat final n'examine pas la problématique de combinaison des contours intérieurs afin de produire le chemin outil final.

Figure 26 Autre exemple de chemin en spirale par combinaisons de contours décalés



Exemple de tracé en spirale. Ce chemin peut être généré grâce à des décalages intérieurs successifs du contour extérieur. En haut à droite, le tracé passe d'un décalage à l'autre.

Les travaux de (Manuel, Liang, & Kolahan, 1996) et (Chen & McMains, 2005) montrent tous deux l'intérêt des polygones décalés intérieurs (*inner offset polygons*) dans la génération d'un chemin en forme de spirale. Cette idée peut potentiellement servir dans notre problématique, le polygone représentant non pas une zone de matière à fraiser mais une zone à chauffer. La ligne du tracé pourra être suivie par les deux moitiés d'une même boucle, l'arrivée d'eau suivant parallèlement le retour d'eau.

En conclusion, après avoir considéré les logiciels industriels, leurs algorithmes et les travaux de recherche liés aux systèmes de chauffage, nous avons élargi notre recherche en abordant le problème sous son angle géométrique. Nous avons pu constater que les algorithmes de génération de chemin outil semblaient les plus prometteurs mais ne pouvaient être utilisés directement.

Nous allons donc proposer la définition d'un algorithme spécifiquement conçu pour le calepinage et intégrant l'utilisation de polygones décalés intérieurs. Notre algorithme manipulera des entités géométriques, utilisera des polygones définissant les zones à chauffer en entrée, et produira une séquence de segments représentant le chemin des tuyaux en sortie.

2.3 Formats des données d'entrée/sortie

En admettant que la génération du calepinage soit résolue, nous devons encore prendre en compte les formats de données en entrée et en sortie afin de pouvoir intégrer notre solution au processus d'entreprise. Les deux formats les plus intéressants de par leur compatibilité et caractéristiques techniques sont le DWG et le DXF.

2.3.1 Exploitation du format DWG

Nous avons ici souhaité analyser les possibilités d'exploitation directe du format DWG afin de déterminer quelles informations sont à notre disposition. Le but est de simplifier au maximum l'utilisation de l'algorithme en évitant à l'utilisateur de devoir ressaisir des informations déjà existantes. Nous examinerons également les bibliothèques à disposition permettant d'exploiter le DWG.

2.3.1.1 Contenu des fichiers DWG

Les fichiers DWG peuvent contenir plusieurs types d'informations. Celles qui nous intéressent en priorité sont les informations géométriques, qui peuvent potentiellement éviter à l'utilisateur de devoir délimiter les zones à la main. D'éventuelles métadonnées associant les entités géométriques entre elles pourraient également s'avérer utiles.

Le format DWG suit la logique d'AutoCAD. Les informations géométriques y sont représentées par des objets (ou entités) correspondant à des primitives géométriques. Les principales sont les suivantes :

- Arc de cercle
- Cercle
- Ligne (un segment de droite défini par deux points)
- Multiligne (une séquence de lignes et d'arcs)

Les formes complexes d'un dessin AutoCAD sont constituées de plusieurs primitives combinées.

Chaque primitive appartient à un calque AutoCAD (« layer ») qui peut être affiché ou non et associer un style d'affichage aux éléments qu'il contient (trait continu ou en pointillé, couleur du trait, épaisseur du trait...). Les calques AutoCAD peuvent également être nommés.

Nous pouvons constater que le DWG permet de stocker des formes géométriques et que ces formes peuvent être groupées grâce aux calques. En théorie, ceci permet à l'utilisateur d'organiser un fichier DWG d'une façon cohérente.

2.3.1.2 Bibliothèques existantes

Le format DWG (DraWinG), créé et maintenu par Autodesk, est le format de fichier natif du logiciel AutoCAD. Bien que le DWG soit répandu, ce format est propriétaire et fermé ; Autodesk n'en a jamais publié les caractéristiques techniques.

Cependant, Autodesk étant un acteur majeur de l'industrie du CAD (Computer Aided Design) (Surperformance SAS), ses logiciels sont utilisés par un grand nombre d'entreprises. Ces dernières ont manifesté le besoin d'exploiter le format DWG directement, dans des applications tierces (non AutoCAD).

Cette situation a mené à l'apparition d'un grand nombre de façons d'exploiter le DWG, certaines venant d'Autodesk, d'autres étant issues de démarches indépendantes.

- Initiatives Autodesk
 - **ObjectARX** : SDK (Software Development Kit) officiel d'AutoCAD. Ce SDK s'exécute directement dans AutoCAD.
 - **RealDWG** : librairie DWG officielle d'AutoCAD, maintenue par Tech Soft 3D et pouvant être exécuté indépendamment d'AutoCAD.
- Initiatives indépendantes

- **L'Open Design Alliance** : un collectif d'industriels maintenant Drawings SDK (anciennement Teigha Drawings), une librairie DWG mise au point par reverse engineering.
- **La librairie C++ LibreDWG** : une initiative open-source permettant de lire des fichiers DWG. Il s'agit de la continuation d'une autre librairie, LibDWG, aujourd'hui peu maintenue et moins puissante que LibreDWG.

Ces différentes approches peuvent être comparées en fonction de diverses caractéristiques :

Tableau 3 Comparaison des outils de lecture/écriture du DWG

	ObjectARX	RealDWG	Open Design Alliance	LibDWG	LibreDWG
Nécessite une licence AutoCAD ?	oui	non	non	non	non
Gratuit ?	non	non	non	oui	oui
Fiabilité	totale	totale	Reverse engineering	Reverse engineering	Reverse engineering

Nous pouvons constater qu'aucune des façons d'exploiter le DWG n'est idéale. Les implémentations officielles sont totalement fiables mais payantes, tandis que les initiatives tierces ont été créées par reverse engineering ce qui peut empêcher une interprétation correcte des fichiers DWG.

Afin d'analyser quelles données pouvaient être extraites de fichiers DWG et d'évaluer la fiabilité du reverse engineering de LibreDWG, nous avons procédé à quelques tests sur différents fichiers d'exemple :

Tableau 4 Résultat des tests de lecture de fichiers DWG

Contenu du fichier	Version du format DWG	Application utilisée pour l'enregistrement	Listing des calques avec dwglayers	Conversion en SVG avec dwg2svg
Plan de bâtiment	AutoCAD 2007	AutoCAD 2008	échoué	réussie
Pièce mécanique ronde	AutoCAD 2010	AutoCAD 2009	réussi	réussie
Levier	AutoCAD 2010	AutoCAD Mechanical 2012	réussi	partielle
Plan de chantier OPAL SYSTEMS	AutoCAD 2010	Inconnue	réussi	partielle

Tous les fichiers testés proviennent directement d'Autodesk à l'exception du plan de chantier (fourni par OPAL SYSTEMS). Chaque fichier a été transmis à deux outils logiciels utilisant LibreDWG (version 0.8.1807 publiée le 14 juillet 2019) :

- **dwg1layers** qui permet de lister les calques présents dans un fichier DWG
- **dwg2svg** qui permet de convertir en SVG la géométrie d'un fichier DWG

Nous pouvons constater que le comportement de la librairie ne semble pas entièrement fiable. En comparaison, la consultation de ces fichiers dans Autodesk DWG TrueView 2020 a réussi dans tous les cas, pour le listing des calques et pour l'affichage des données géométriques.

2.3.1.3 Pertinence du DWG dans la problématique

Nous pouvons constater qu'une exploitation fiable du DWG requiert de préférence l'utilisation d'une librairie officielle afin d'assurer une interprétation correcte du format. Cependant, même en faisant abstraction de cette problématique, il y a plusieurs obstacles à l'exploitation directe des données d'un DWG dans notre cas.

Un des problèmes est l'absence de standard interne chez OPAL SYSTEMS pour la délimitation des zones de distribution et à chauffer. Ceci s'explique par le fait que la délimitation des zones et le tracé du parcours des tuyaux sont réalisés directement et manuellement sur le plan. Par la suite, ces informations sont utilisées uniquement par des êtres humains, d'où l'absence d'un quelconque marquage technique qui permettrait à un programme de les interpréter correctement.

De plus, l'utilisation de plans AutoCAD n'est pas systématique chez OPAL SYSTEMS, une bonne partie de ceux-ci étant transmis en format PDF. Même si les plans étaient à disposition en DWG, utiliser la géométrie existante poserait les problèmes suivants :

- **Difficulté à exploiter des groupes d'entités :** Dans une utilisation basique d'AutoCAD, les primitives géométriques sont habituellement groupées par calques. On peut également grouper des entités via la multiligne, qui peut être une façon d'associer un ensemble de lignes et d'arcs. Cependant, il reste très difficile de se servir de ces groupements (par exemple dans le cas d'un mur séparant deux pièces, différentes parties de la même multilignes représentent la frontière de zones différentes).
- **Définition manuelle des obstacles :** Même en utilisant la géométrie d'un fichier AutoCAD, il faudra déterminer quelles primitives représentent un obstacle au traçage. Si tous les objets représentent des obstacles, le moindre objet sur le plan va influencer le tracé, y compris des objets qui pourraient être sous le sol, au plafond ou qui n'ont pas d'existence physique dans la réalité. Dans certains cas, cela peut être souhaitable, mais dans d'autres non. La distinction ne peut pas s'opérer automatiquement, chaque plan étant spécifique et pouvant suivre des conventions

particulières. Il faudrait donc fournir la possibilité de supprimer des objets géométriques pour retirer les objets ne représentant pas un obstacle ou au moins la possibilité de ne prendre en compte que certains calques.

- **Espaces ouverts** : Il n'y a en théorie aucune garantie que les objets géométriques représentant une pièce puissent former un polygone fermé. Certaines parois intérieures intègrent par exemple une ouverture sans porte.
- **Zones étendues à subdiviser** : Il pourrait être nécessaire, pour certaines grandes pièces, d'éventuellement diviser la zone à chauffer en plusieurs zones plus petites ayant chacune une boucle.

Pour toutes les raisons précitées, notamment la variété des formats des plans (PDF et DWG), nous privilégierons la stratégie suivante :

- Convertir le plan sur lequel travailler en image (par copier-coller, capture d'écran ou plotting (impression) dans le cas d'AutoCAD)
- Tracer manuellement les polygones des zones de distribution et zones à chauffer au-dessus de l'image obtenue

Le traçage manuel des polygones ne prend pas beaucoup de temps pour l'utilisateur, surtout en comparaison avec un traçage manuel de toutes les zones. Une fois les polygones saisis, il devient possible d'implémenter un algorithme de traçage.

2.3.2 Exploitation du format DXF

Une fois les données reçues et traitées par l'algorithme, leur format de sortie doit être déterminé. Même si les chemins générés semblent corrects, ils peuvent nécessiter des rectifications manuelles. Ces opérations seront réalisées sous AutoCAD.

Le format DXF (Drawing Exchange Format) est un format créé et maintenu par la société Autodesk et créé pour faciliter l'échange de données avec des applications non-AutoCAD. Il s'agit de la façon officielle de partager des données de dessin entre AutoCAD et des applications tierces.

Le format DXF est un format ouvert ; sa spécification étant publique, il génère une bonne compatibilité entre les différents systèmes existants. De plus, il est basé sur les caractères imprimables du jeu ASCII (American Standard Code for Information Interchange) ce qui permet de l'implémenter et de le lire facilement. Enfin, grâce à la simplicité du format, plusieurs implémentations existent sur diverses plateformes (JDxF pour Java, netDXF pour C#, paquets ezdxif et python-dxf pour Python...).



Considérant toutes ces caractéristiques, le format DXF est un format de sortie idéal. Une fois le tracé généré, il pourra être converti en DXF et importé dans AutoCAD afin d'effectuer les ajustements manuels nécessaires.

3 Méthodologie

Lors de nos recherches, aucune description précise d'un algorithme recouvrant notre cas d'utilisation n'a été trouvé. Les logiciels industriels permettent d'automatiser le calepinage, mais les algorithmes utilisés ne sont pas documentés. Les travaux de recherche concernant les systèmes de chauffage existent mais aucun des documents examinés n'aborde le problème du calepinage.

Nous allons donc élaborer un algorithme spécifique, en réutilisant l'idée des polygones décalés intérieurs exploitées par les algorithmes CNC. La mise au point de l'algorithme requiert d'effectuer plusieurs tests sur les différentes instances du problème susceptibles d'être rencontrées. Pour cette raison, la démarche ne peut être exclusivement théorique et requiert une implémentation.

Une fois l'implémentation réalisée, les résultats obtenus seront comparés à ceux constatés sur le terrain afin de réaliser une évaluation qualitative.

3.1 Développement

Nous nous concentrerons ici sur l'élaboration de l'algorithme à proprement parler. Les problématiques d'import et d'export de données seront abordées dans la section **Implémentation**. Nous partons donc du postulat que toutes les données nécessaires sont à notre disposition (en l'occurrence, la délimitation des zones à parcourir et l'échelle des polygones par rapport à la réalité).

Nous détaillerons les points suivants :

- **Comportement de l'algorithme** : Cette section consiste en un résumé de ce que l'algorithme fait, décrit de façon informelle.
- **Données en sortie** : Cette section aborde les données produites par l'algorithme et les traitements qu'elles doivent subir.
- **Données en entrée** : Cette section concerne les données qui doivent être fournies à l'algorithme pour qu'il puisse réaliser sa tâche.
- **Mécanisme de traçage** : Cette section décrit le fonctionnement de l'algorithme, de façon aussi complète que possible.
- **Limitations de l'approche choisie** : L'algorithme décrit dans ce document fonctionne bien dans certains cas mais souffre de certaines limitations. Cette section détaille les cas problématiques et propose d'éventuelles solutions.
- **Implémentation des boucles parallèles** : Les boucles parallèles étant très régulièrement utilisées par OPAL SYSTEMS, nous proposons ici une façon de les

implémenter à partir de l'algorithme décrit, normalement utilisé pour des cas plus basiques.

- **Application au calepinage des chauffages au sol** : Certaines idées de base concernant l'utilisation de l'algorithme pour le calepinage sont abordées dans les sections dévolues aux données en entrée et en sortie. Afin de ne pas entraver la compréhension par des digressions trop importantes, les problèmes plus spécifiques sont abordés à la fin du développement.

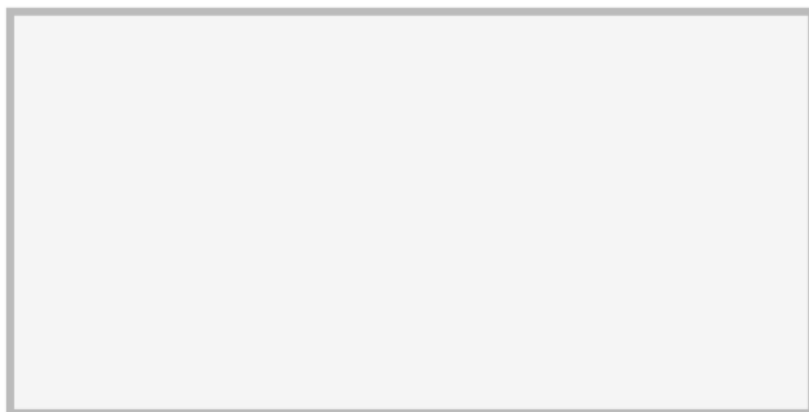
Une fois l'algorithme présenté, ce dernier sera utilisé dans une implémentation expérimentale qui intégrera les données importées (une image du plan), générera les données calculées (les quantités de matériel requis) et exportera les résultats (le tracé suivi par le tuyau en format DXF).

Au final, l'association des résultats obtenus (quantités de matériel et tracé) permettront d'effectuer la pose du système ; les ouvriers installeront le matériel, guidés par le plan de calepinage.

3.1.1 Comportement de l'algorithme

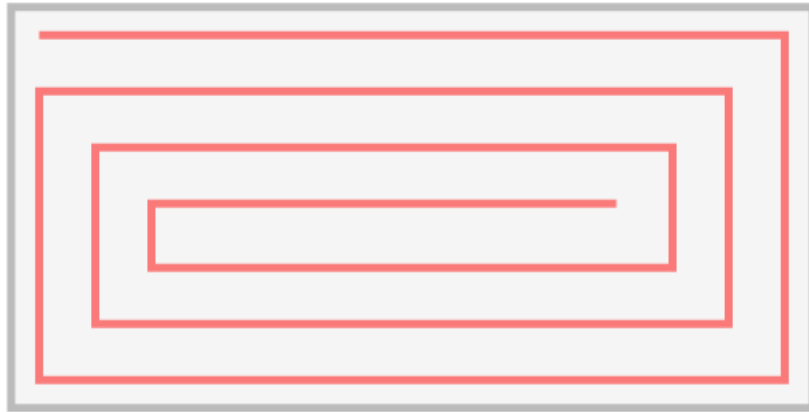
L'algorithme que nous présentons ici permet de générer un ou des chemins en spirale remplissant entièrement un polygone simple (au sens mathématique), en partant d'un segment donné de ce polygone. Les chemins consisteront en des lignes composées de segments de droite qui parcourront en spirale et de l'extérieur vers l'intérieur la région définie par le polygone.

Figure 27 Exemple de polygone à remplir



Un polygone à remplir.

Figure 28 Exemple de polygone rempli



Le résultat retourné par l'algorithme. Le tracé rouge parcourt le polygone en spirale jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de place disponible. Le segment nord était ici le segment de départ.

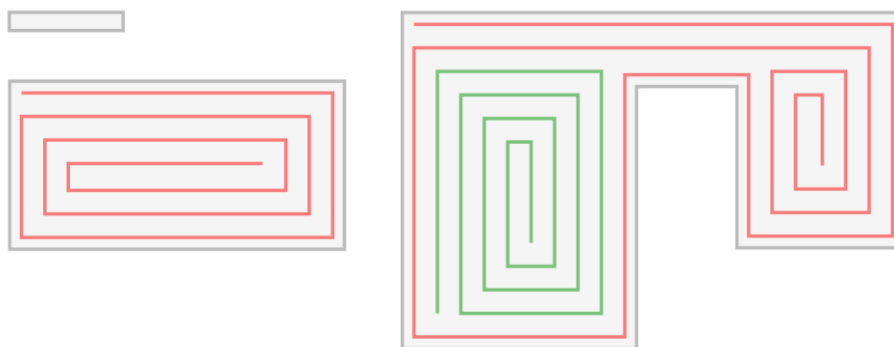
Le tracé généré est ensuite converti en chemin de tuyau en suivant la méthode expliquée plus bas dans ce document.

3.1.2 Données en sortie

La sortie de l'algorithme est un ensemble contenant zéro, une ou plusieurs lignes brisées localisées dans un espace 2D.

- Un ensemble vide signifie que l'algorithme n'a pas pu commencer le moindre tracé. Ceci peut se produire si le polygone ne fournit pas l'espace minimal suffisant.
- Un ensemble contenant une seule ligne brisée signifie que le polygone a pu être rempli entièrement à l'aide d'un seul tracé.
- Un ensemble contenant plusieurs lignes brisées signifie que le tracé initial n'a pas pu parcourir entièrement le polygone et a engendré l'apparition de zones vides. D'autres tracés ont donc été générés pour combler ces zones non parcourues.

Figure 29 Les trois types de sortie possibles de l'algorithme



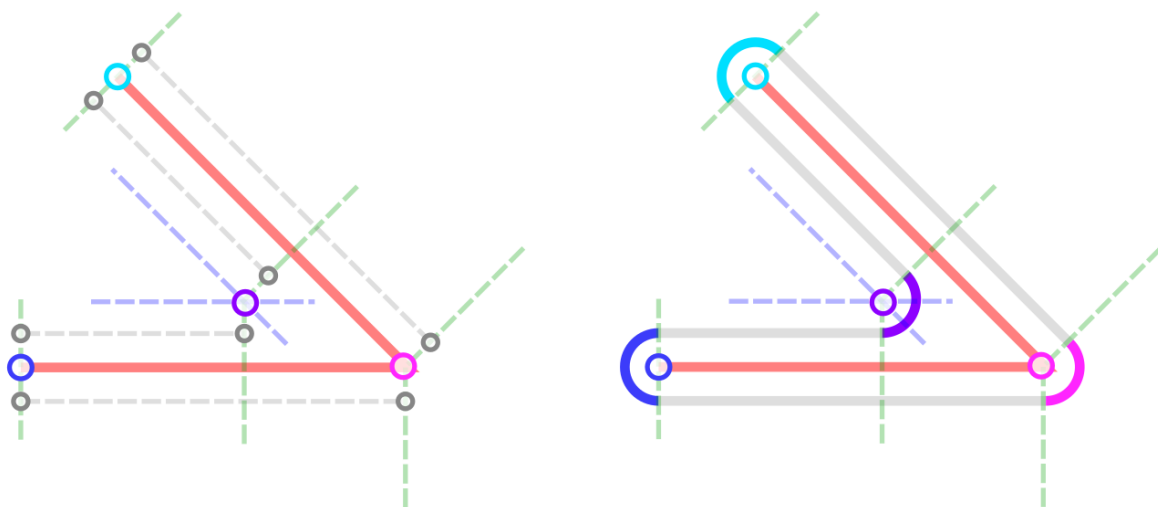
Les trois cas possibles de l'algorithme. Le premier polygone en haut à droite est trop petit pour débiter un tracé. Le second en bas à gauche a pu être parcouru par un seul tracé. Le troisième à droite a nécessité deux tracés pour être rempli, le premier tracé (rouge) ayant laissé une zone non remplie comblée par le deuxième tracé (vert).

Chacune des lignes brisées retournées par l'algorithme est ensuite convertie en parcours de tuyau.

3.1.2.1 Conversion du tracé en chemin de tuyau

Bien qu'il soit possible que l'arrivée d'eau et le retour d'eau d'une boucle ne soient pas côte à côte, ils le sont la plupart du temps. L'algorithme tire parti de cela en considérant le tracé en lui-même comme une abstraction du parcours suivi par le tuyau. Afficher ce parcours nécessite une conversion.

Figure 30 Conversion du tracé en chemin de tuyau



Gauche : éléments géométriques utilisés pour convertir un tracé en parcours de tuyau. Droite : résultat de la conversion.

La Figure 30 montre les différents éléments géométriques utilisés pour afficher le parcours du tuyau. La partie gauche de la figure montre le tracé en rouge. La construction du parcours du tuyau se déroule en plusieurs étapes :

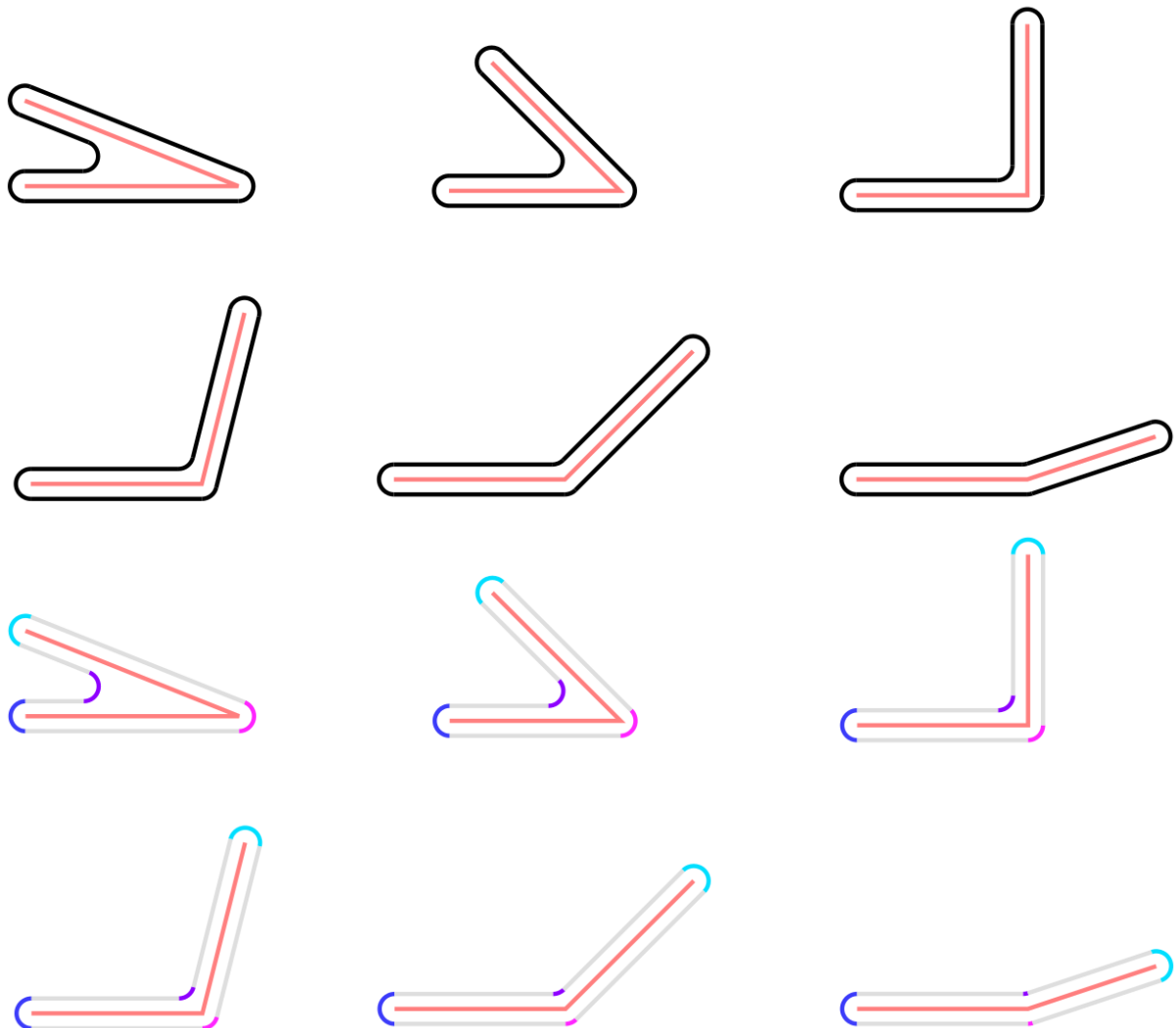
- 1) Les points du tracé correspondent tous à des centres d'arcs et peuvent être utilisés directement (centres bleu foncé, rose, bleu clair). Les virages intérieurs (angles inférieurs à 180°) nécessitent de calculer un centre d'arc (cercle violet) en décalant les deux segments du virage vers l'intérieur (droites en bleu pointillé).
- 2) Une fois tous les centres d'arcs obtenus, des droites perpendiculaires au tracé passant par ces centres sont calculées (pointillé vert). La ou les perpendiculaires passant par un centre d'arc définit l'angle de l'arc.
- 3) Enfin, des parallèles aux segments du tracé sont dessinées (gris pointillé). Les intersections entre les parallèles et les perpendiculaires correspondent aux points de début et de fin d'un arc, mais également aux points de départ et d'arrivée des segments de droite représentant le tuyau.

La partie droite montre le résultat du processus : le tracé est entouré d'une ligne composée d'arcs de cercle et de segments de droite. Cette ligne contient plusieurs éléments :

- Un demi-cercle au début du tracé (bleu foncé),
- Un demi-cercle à la fin du tracé (bleu clair),
- Des arcs de cercle à l'intérieur des virages (violet),
- Des arcs de cercle à l'extérieur des virages (rose),
- Des segments de droite parallèles aux segments du tracé (gris).

Cet algorithme peut être utilisé quel que soit l'angle formé par le tracé. La Figure 31 montre le résultat obtenu pour différents angles.

Figure 31 Exemple de conversion de tracés en chemin de tuyau à différents angles



Exemples de parcours de tuyau générés pour différents angles de tracé.

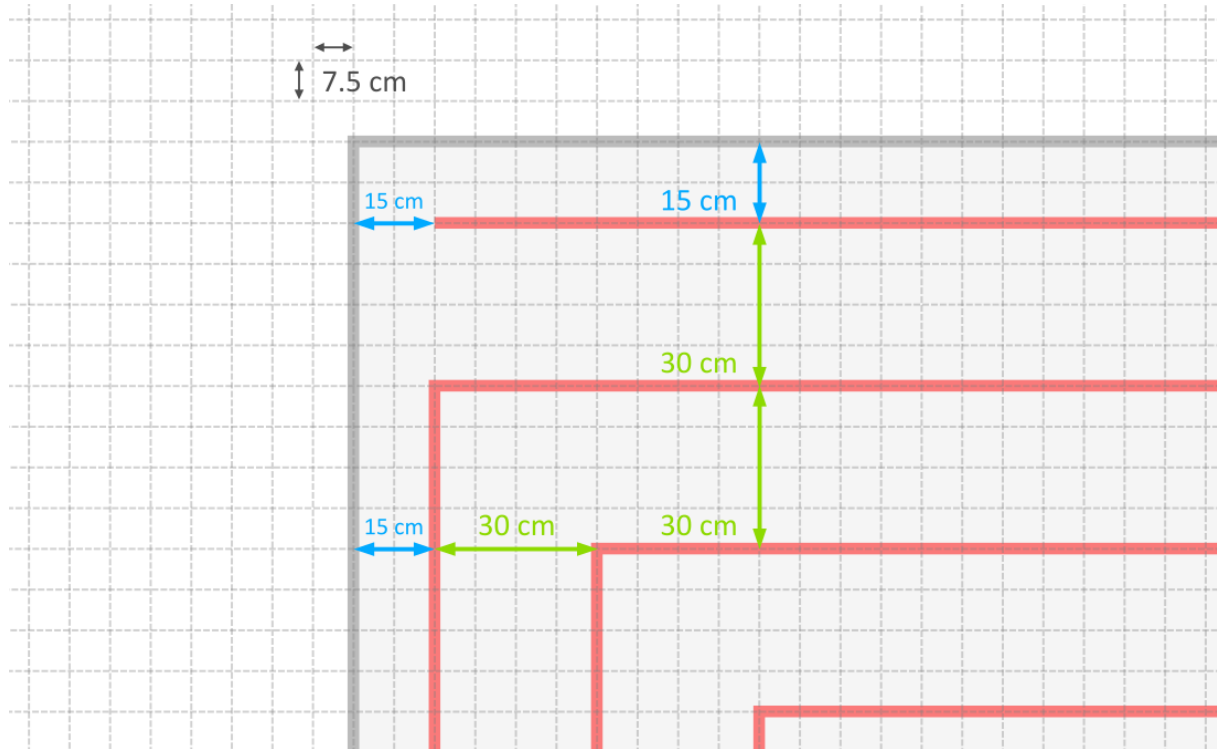
Nous pouvons notamment observer que plus les angles sont étroits (45° et moins), plus l'arc intérieur du virage est repoussé vers l'intérieur. Dans les cas extrêmes, le parcours de tuyau

obtenu peut ne plus être réaliste. Cependant, des angles aussi étroits sont très rares dans la pratique.

3.1.2.1.1 Gestion des espacements

Afin de respecter les contraintes d'espacement en bord de zone et de tuyau à tuyau, le tracé respecte des marges précises. La Figure 32 montre le cas de l'angle droit d'un polygone, à l'endroit où le tracé en spirale a débuté.

Figure 32 Principaux espacements respectés par le tracé

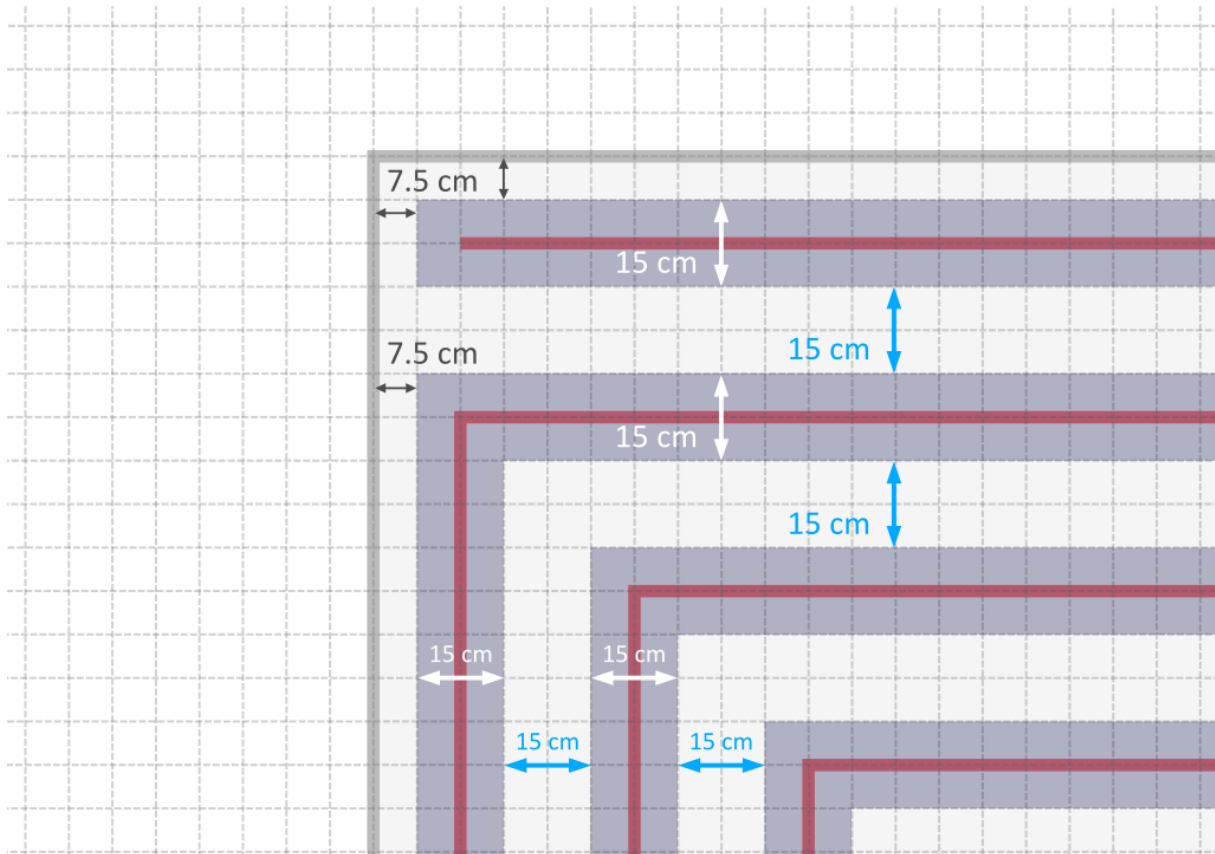


Correspondance entre dimensions réelles et représentation géométrique.

Une grille de 7.5 cm de côté a été superposée au polygone et à son tracé. Nous pouvons observer la présence de deux espacements : 15 cm entre le bord du polygone et le tracé, et 30 cm entre deux traits du tracé.

Les marges laissées autour du tracé sont précisément conçues pour respecter les contraintes du problème. La Figure 33 met en évidence les régions de l'espace qui appartiendront approximativement à l'intérieur d'une boucle.

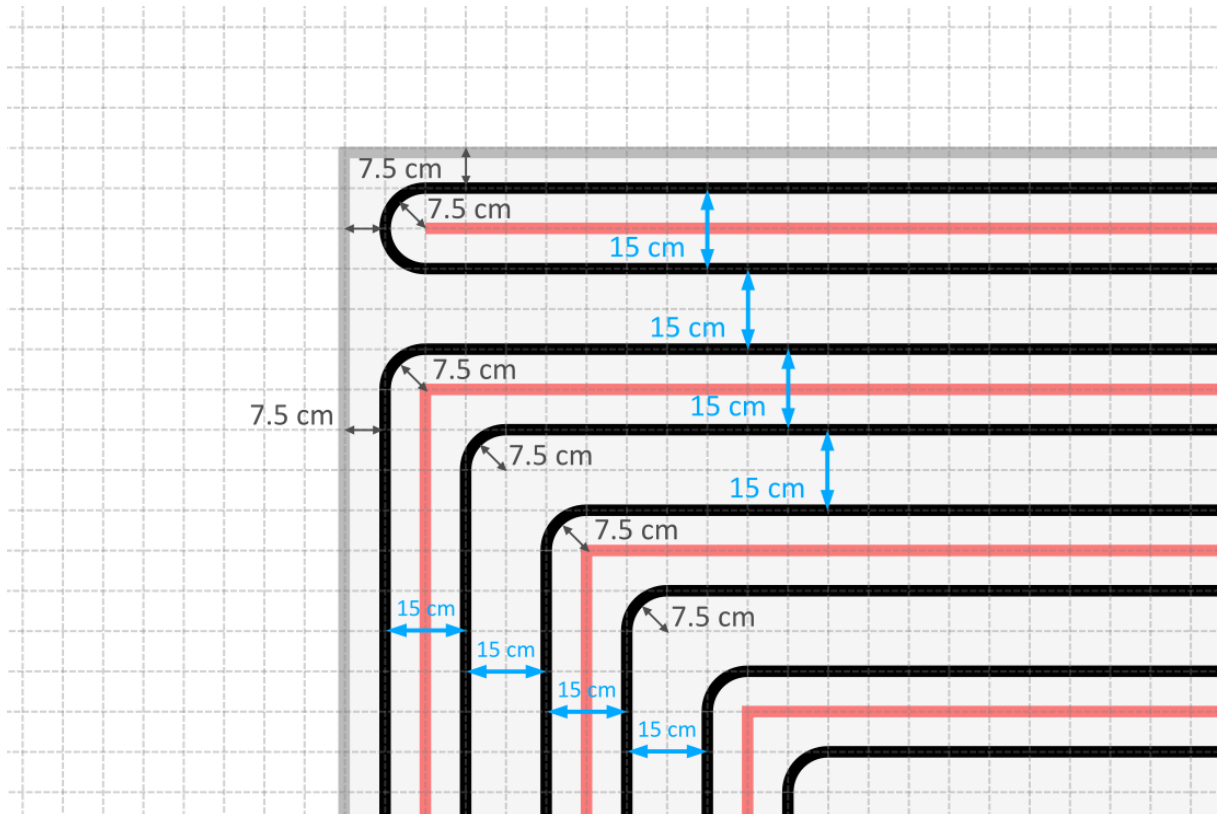
Figure 33 Mise en évidence de l'espace intérieur d'une boucle



Mise en évidence de l'intérieur de la boucle (zone foncée) et des espacements résultants.

Nous pouvons constater que les espacements requis sont respectés : les 7.5 cm de marge avec le bord de la zone ainsi que les 15 cm à maintenir entre les tuyaux. La Figure 34 montre l'état final de l'affichage, après l'ajout du chemin du tuyau.

Figure 34 Visualisation des espacements avec un chemin de tuyau



Le chemin final du tuyau et les dimensions correspondantes.

Les marges de 15 cm et 30 cm utilisées lors du traçage produisent un chemin de tuyau correct après la conversion du tracé.

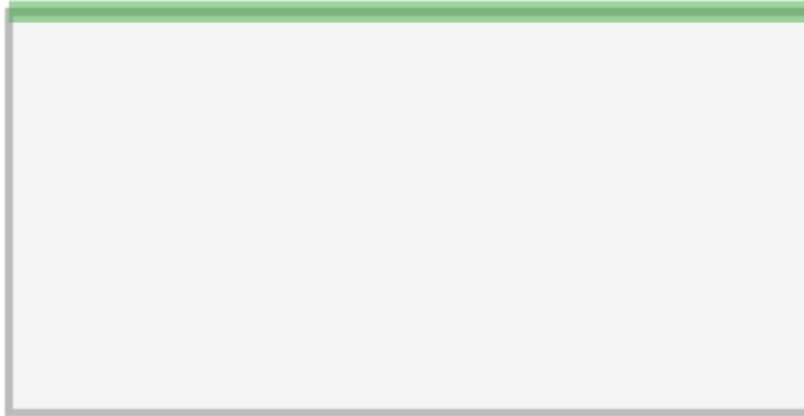
Le cas ci-dessus est celui d'un angle droit, cependant la méthode suivie produit des résultats corrects, quel que soit l'angle envisagé.

3.1.3 Données en entrée

En entrée, l'algorithme nécessite les paramètres suivants :

- un polygone
- un segment de ce polygone à partir duquel commencer le tracé
- l'espacement entre le bord du polygone et le tracé
- l'espacement entre deux traits du tracé

Figure 35 Polygone et segment de départ



Un polygone (en gris) avec son segment de départ (surligné en vert).

Le polygone peut être convexe ou concave. Il doit être simple (non croisé, c'est-à-dire sans segments se croisant) et non dégénéré (contenant au moins trois points).

Pour que le tracé puisse être effectué, il doit également avoir une aire non nulle et fournir un espace suffisant pour permettre de commencer le tracé. Cette condition peut se vérifier en construisant un autre polygone représentant une région minimale suffisamment longue et large pour qu'un tracé puisse commencer et se terminer. Si ce polygone de contrôle est entièrement inclus dans le polygone à parcourir, alors le tracé peut débuter.

3.1.3.1 Note sur le segment de départ

Le départ du tracé à partir d'un segment prédéfini n'est pas nécessaire pour générer le tracé. En théorie, l'algorithme peut être exécuté quel que soit l'endroit où le tracé commence.

Dans la pratique, certains cas particuliers peuvent bloquer trop tôt la génération du tracé ou ne pas être cohérent avec la réalité. Décider de quel segment partir a deux utilités :

- Permettre d'obtenir un meilleur tracé qui parcourra davantage d'espace
- S'assurer que le début de la spirale commence à l'endroit de la zone à chauffer où la boucle en provenance du collecteur arrive.

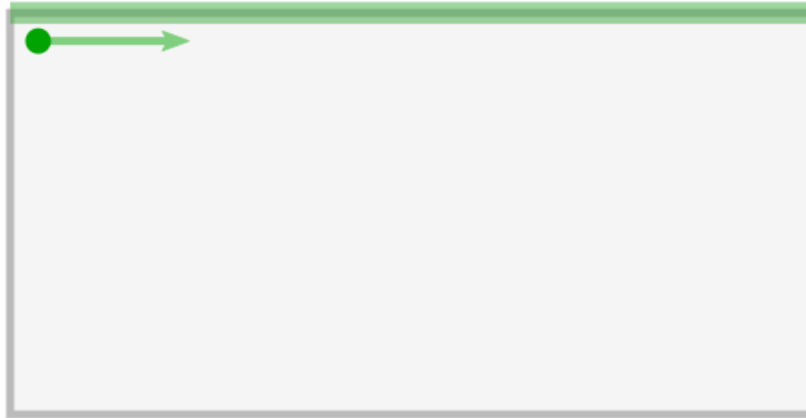
3.1.4 Mécanique de traçage

Pendant l'exécution de l'algorithme, la ligne brisée représentant le tracé est construite segment par segment. Afin de gérer cette construction, l'algorithme crée et maintient un état interne composé notamment des variables suivantes :

- **La position actuelle** : cette position représente l'endroit où le dernier segment se termine et où le segment suivant va commencer

- **Le segment actuel** : ce segment est celui suivi pendant le traçage du segment suivant du tracé. Le segment actuel peut être une arête de polygone ou un segment appartenant au tracé en cours de réalisation.

Figure 36 Position actuelle, direction actuelle et segment actuel



Début de l'itération 1. Le tracé débute à la position actuelle (cercle vert) en suivant une direction (flèche verte) donnée par le segment suivi (surligné en vert clair).

Les points du tracé sont ensuite générés grâce à une séquence de collisions.

3.1.4.1 Collisions

Une collision se produit lorsque le tracé rencontre un obstacle. Cet obstacle peut être :

- soit un bord du polygone,
- soit un segment du tracé en cours de génération.

Le polygone étant par définition fermé, le tout premier obstacle rencontré sera un bord de polygone. Chaque segment du bord représente un obstacle que le tracé ne doit pas franchir et définit deux segments de collision qui seront utilisés pour dévier le tracé. La distance minimale entre le tracé et un bord du polygone peut être ajustée en éloignant ou en rapprochant les segments de collision. Dans notre cas, elle correspond à 15 cm dans la réalité.

Figure 37 Segments de collision des bords d'un polygone



Le polygone (en gris) permet de définir des segments de collision (en bleu pointillé) qui feront obstacle au traçage. Ce polygone possède quatre arêtes et définit donc huit segments de collision.

La détection des obstacles utilise la géométrie et se base sur les intersections entre des droites et des segments. Ici, nous utilisons deux droites afin de simuler l'épaisseur de la boucle. Si nous en utilisions une seule, nous risquerions de faire passer la boucle par des espacements trop étroits et nous ne respecterions plus les contraintes du problème.

Figure 38 Collision avec un bord de polygone



Itération 1. Une illustration des collisions détectées par l'algorithme. Les droites de la direction du tracé (en vert) ont des intersections avec les segments de collision (en bleu pointillé). Les segments de collision du dernier segment suivi ou tracé (en gris pointillé) sont ignorés.

Les intersections sont calculées entre les droites suivant la direction du tracé et tous les segments de collisions répertoriés jusqu'à présent. Le dernier segment tracé (s'il existe) et le dernier segment suivi sont cependant ignorés ; dans le cas contraire, ils provoquent l'apparition de collisions très proche de la position actuelle. Ces collisions ne sont pas pertinentes et, dans certains cas, font tourner le tracé en boucle dans un coin du polygone.

Figure 39 Sélection des intersections issues d'une collision



Itération 1. Seules les intersections qui se trouve devant le tracé (zones rouge et verte) et à une distance suffisante (zone verte) peuvent continuer le tracé.

Lorsque les intersections ont été calculées, il est nécessaire de déterminer quelle intersection correspond au point suivant. Deux critères permettent d'éliminer les intersections indésirables :

1. L'intersection doit se situer dans le demi-plan défini à partir de la position actuelle et dans lequel le tracé se dirige
2. L'intersection doit se situer à une distance minimale de la position actuelle

Le premier critère évite de considérer les intersections se trouvant dans la direction opposée à la direction actuelle.

Le deuxième critère existe afin de s'assurer qu'il y aura un espace suffisant pour permettre de respecter le rayon de courbure du tuyau lors de virages ou de demi-tours. Dès qu'une intersection se trouve trop proche de la position actuelle, le tracé s'arrête.

Dans le cas où aucune intersection trop proche n'existe et que plusieurs intersections restent possibles, seule l'intersection la plus proche de la position actuelle est conservée.

Il faut ici noter que l'intersection obtenue n'est pas le point suivant du tracé. De plus, même si ce point était connu, il reste nécessaire de savoir quelle direction suivre à l'itération suivante.

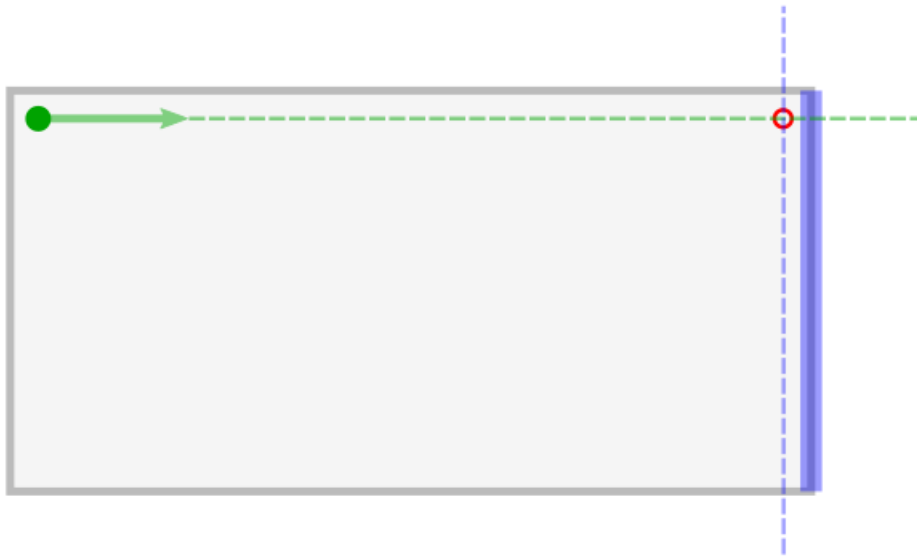
Ces informations sont obtenues de la façon suivante : le segment de collision rencontré est transformé en une droite, puis une droite suivant la direction du tracé est créée.

L'intersection entre les deux droites représente le point suivant du tracé. La direction à suivre est celle définie par l'obstacle lié au segment de collision rencontré.

Dans notre modèle, chaque segment est défini par un **point de départ** et un **point d'arrivée**. Cette distinction permet de définir l'**orientation du polygone** (horaire ou anti-horaire, soit le sens dans lequel les points ont été tracés). Cette orientation sera celle suivie par la spirale, de l'extérieur vers l'intérieur.

L'orientation permet également de savoir si l'intérieur du polygone se situe à gauche ou à droite d'un segment. Ceci est notamment utilisé pour créer la droite contenant le segment de collision. La droite étant décalée vers l'intérieur du polygone, le point suivant du tracé sera également à l'intérieur.

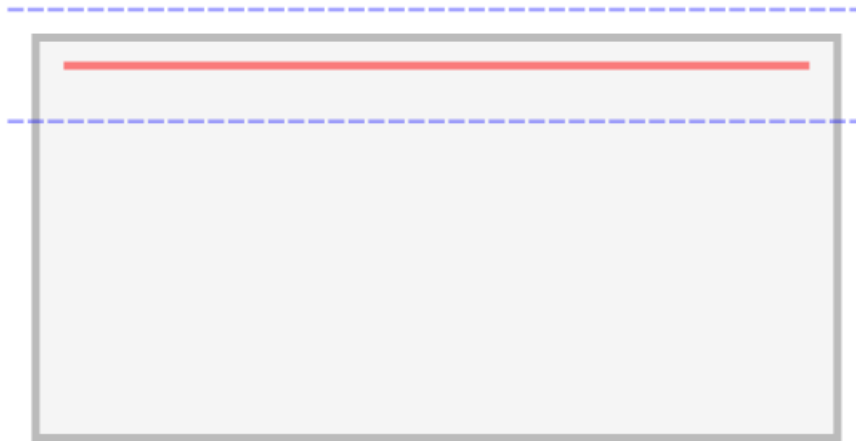
Figure 40 Fin d'itération 1 avec position suivante déterminée



Fin de l'itération 1. Le point suivant du tracé (cercle rouge) est obtenu en calculant l'intersection de la droite de la direction du tracé (pointillé vert) et de la droite à laquelle le segment de collision appartient (pointillé bleu). L'obstacle lié au segment de collision est ici le bord du polygone (surligné en bleu) et définit la nouvelle direction à suivre.

Une fois le point suivant et la direction suivante obtenue, un nouveau segment peut être ajouté au tracé. Ce nouveau segment représente un obstacle de plus qui risque d'être rencontré et qui, en conséquence, réduit l'espace parcourable par le tracé.

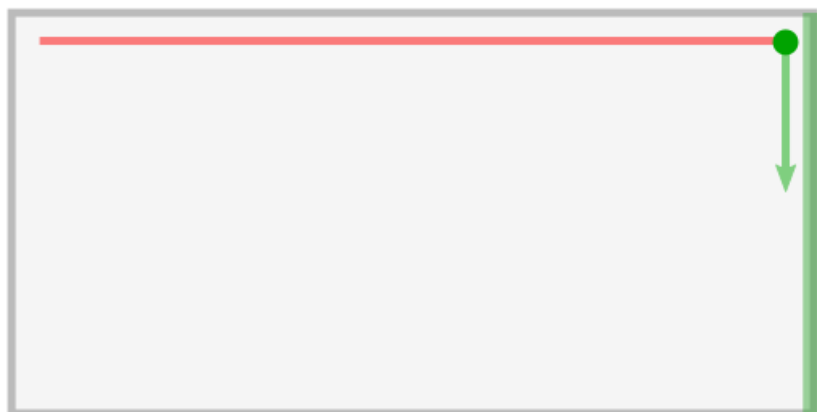
Figure 41 Segments de collision d'un segment de tracé



Résultat de l'itération 1. Le nouveau segment ajouté au tracé (en rouge) avec les segments de collision lui correspondant (en bleu pointillé).

Les marges autour des segments du tracé sont plus grandes que celles autour des bords du polygone. Ceci est dû au fait que les bords du polygone correspondent aux 7.5 cm des panneaux MDF, tandis que les segments de tracé doivent maintenir les 15 cm de marge entre tuyaux.

Figure 42 Début de l'itération 2



Début de l'itération 2. Le premier segment du tracé a été créé (en rouge). La position actuelle (cercle vert) a maintenant changé ainsi que la direction à suivre (flèche verte) et le segment suivi (surligné en vert).

L'opération que nous venons de décrire est répétée jusqu'à ce qu'on trouve une intersection trop proche de la position actuelle. Dans un tel cas, le tracé ne peut plus continuer et est considéré comme terminé.

Dans la plupart des cas, le tracé va effectuer plusieurs tours du polygone. Il entrera alors en collision avec lui-même.

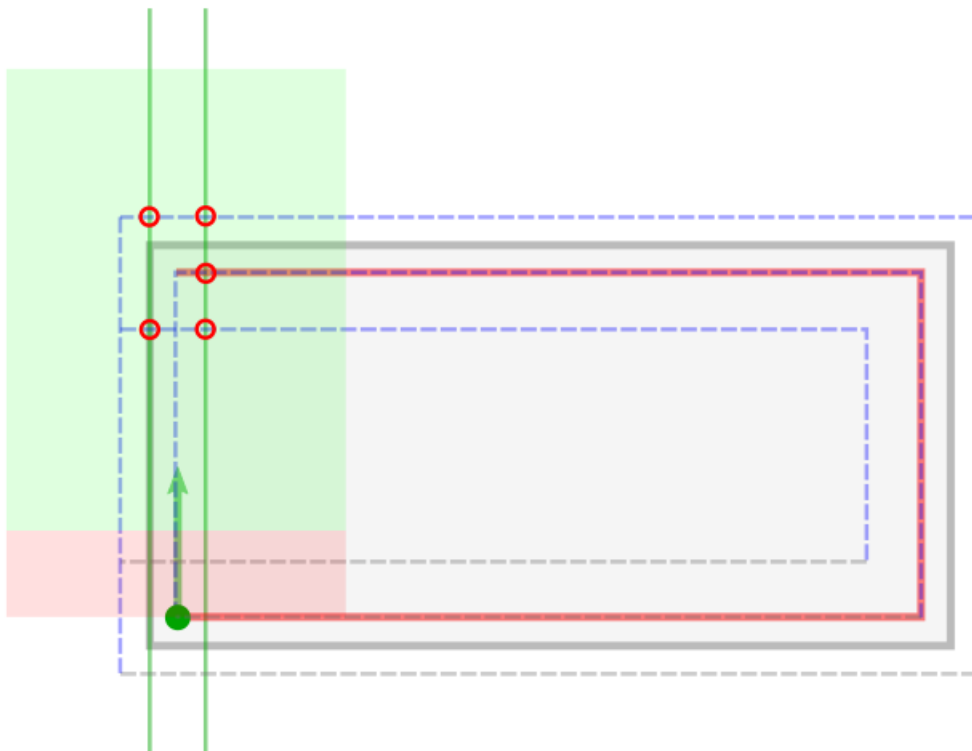
Figure 43 Début de l'itération 4. Collision avec la position de départ.



Début de l'itération 4. Tous les segments de collision sont en bleu pointillé. Les segments de collision du dernier segment tracé et du dernier segment suivi (gris pointillé) sont ignorés.

Lorsqu'une collision avec le tracé se produit, les règles décrites précédemment s'applique. La seule différence significative est qu'une marge plus large est maintenue depuis le centre du tracé.

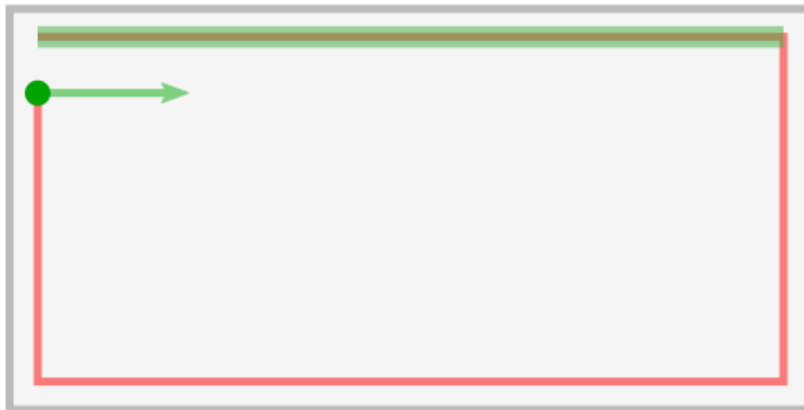
Figure 44 Intersections de collision avec le premier segment du tracé.



Itération 4. La collision a lieu avec le premier segment du tracé.

Une collision avec le tracé provoque une situation très similaire à une collision avec le bord du polygone. À l'itération suivante, au lieu de suivre un des bords du polygone, le tracé suit ses propres segments.

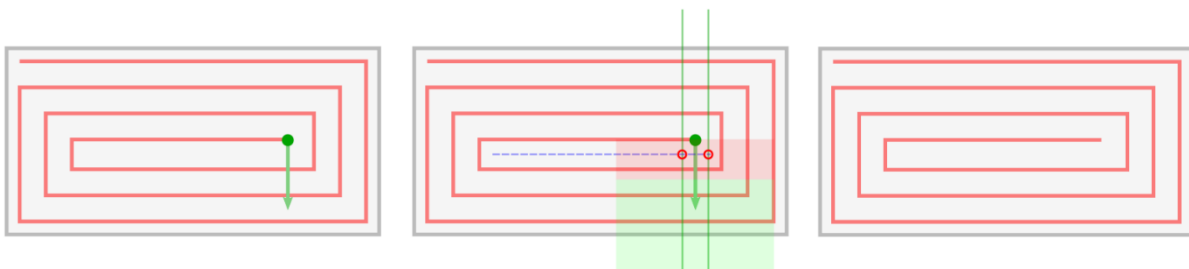
Figure 45 Début d'un deuxième tour de spirale



Début de l'itération 5. Le segment suivi (surligné en vert) est maintenant un segment du tracé. La position actuelle (cercle vert) est presque revenue au point de départ.

Au bout d'un certain nombre d'itérations, le tracé ne trouvera plus la place nécessaire pour pouvoir continuer. Les collisions détectées vont être si proches de la position actuelle que le rayon de courbure minimal du tuyau ne permettra plus de suivre le tracé. L'algorithme s'arrête donc à ce stade.

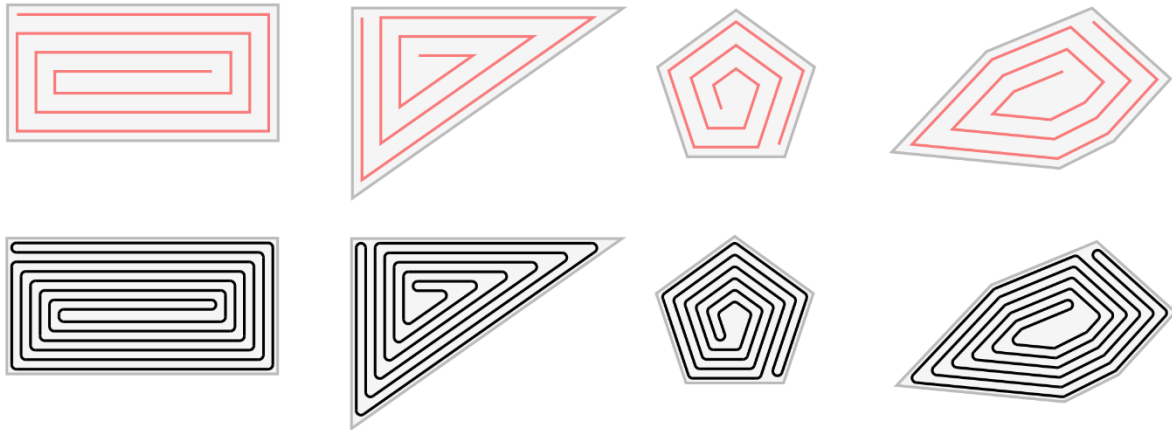
Figure 46 Fin d'exécution de l'algorithme



Dernière itération. Les collisions étant trop proches de la position actuelle, l'algorithme doit s'arrêter pour maintenir le respect des contraintes.

Une fois le tracé terminé, il est converti en parcours de tuyau. La Figure 47 montre quelques exemples de polygones fournis en entrée de l'algorithme et le parcours de tuyau correspondant aux tracés obtenus.

Figure 47 Exemple de génération de tracés sur divers polygones convexes



Exemples de résultats obtenus avec des polygones convexes. L'orientation de la spirale et le segment de départ varient.

Les résultats obtenus correspondent au comportement voulu. Les différents angles sont correctement gérés et l'ensemble du polygone est parcourue par le tracé. De plus, l'algorithme fournit un degré de flexibilité en permettant de changer l'orientation de la spirale et de partir de n'importe quel segment.

3.1.4.2 Gestion des concavités

Nous avons pu constater que l'algorithme fournit des résultats corrects dans le cas de polygones convexes. Cependant, il est extrêmement rare que des zones suivant le contour des pièces d'un bâtiment soient convexes ; elles contiendront des concavités dans la majorité des cas. Il est donc judicieux d'examiner le comportement de l'algorithme lorsqu'il est utilisé sur des polygones concaves.

La Figure 48 illustre le cas d'un polygone concave à cinq sommets.

Figure 48 Début du tracé d'un polygone concave



Les états d'un polygone concave aux débuts des itérations 1 et 4.

Au début de l'itération 4, nous pouvons remarquer que si le tracé était prolongé dans la direction actuelle, il entrerait apparemment en collision avec un segment du tracé, sans

suivre le bord. Si tel était le cas, nous nous retrouverions dans le cas représenté dans la Figure 49. Le polygone ne serait alors que partiellement rempli, ce qui n'est pas un résultat souhaitable.

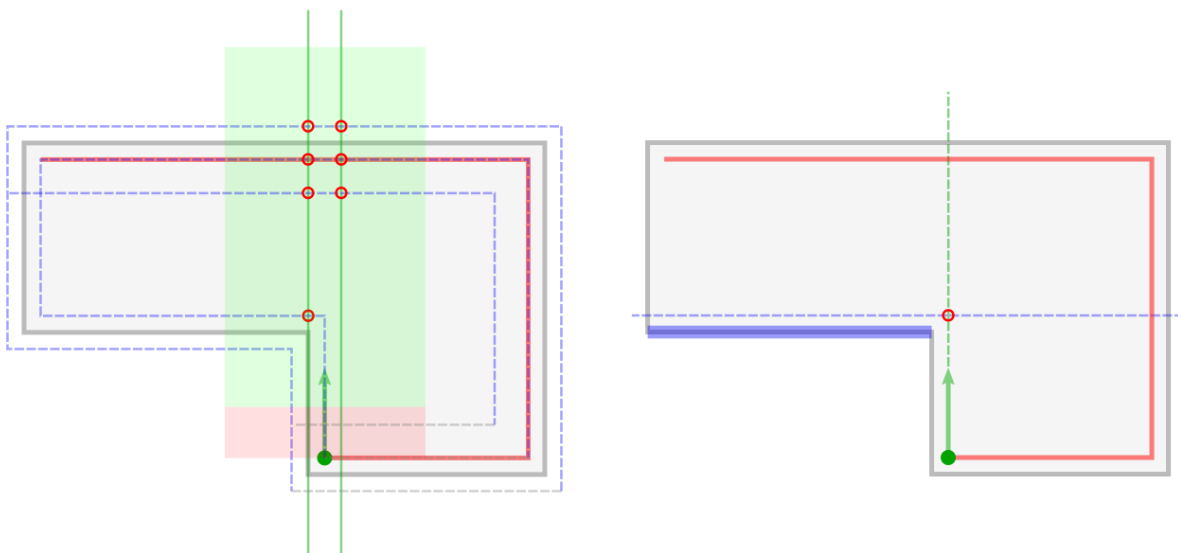
Figure 49 Évolution de tracé dans un polygone concave en l'absence de collision avec un sommet concave



L'évolution du tracé, en admettant qu'il n'entre pas en collision avec le bord suivant du polygone.

Cependant, un tel cas ne peut normalement pas survenir si l'algorithme est implémenté correctement. En effet, même si en apparence le tracé semble entrer en collision avec lui-même, les droites prolongeant le tracé rencontrent d'abord le segment de collision du bord suivant du polygone. Ce fonctionnement est mis en évidence dans la Figure 50.

Figure 50 Collision avec sommet concave



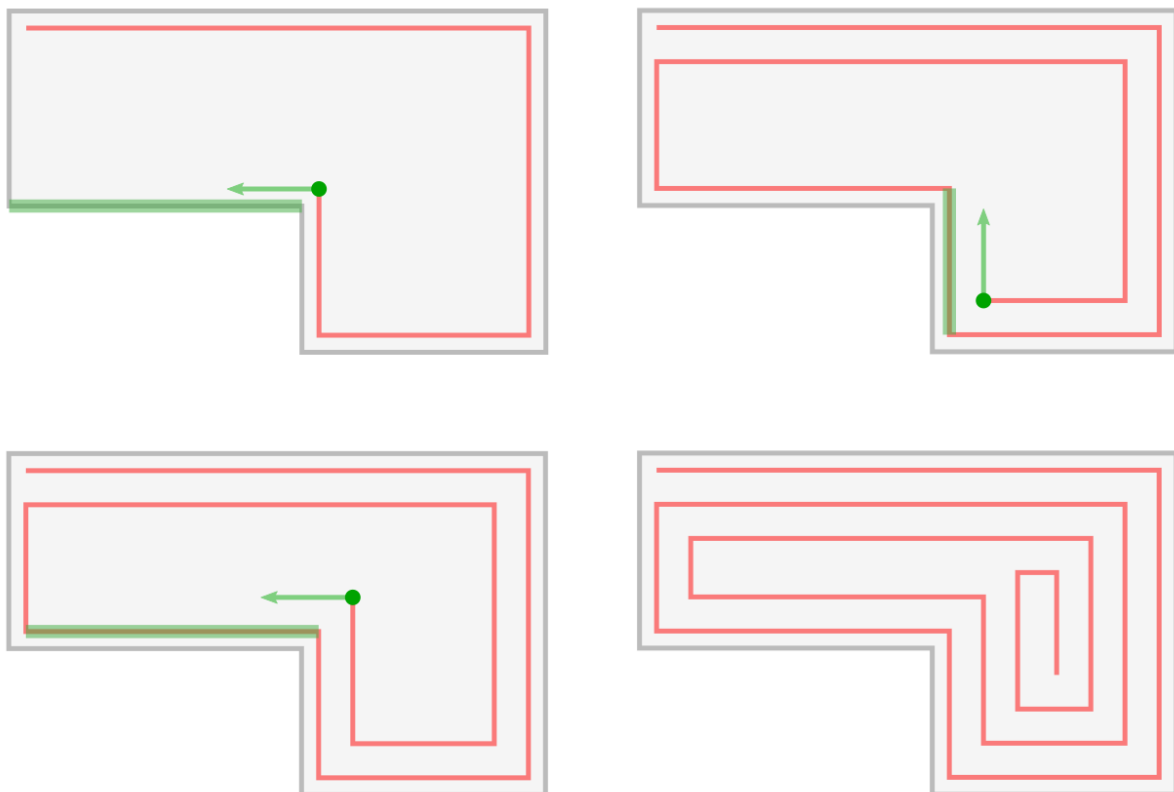
À gauche, les collisions détectées à l'itération 4. À droite, le calcul du point suivant du tracé.

Nous pouvons constater qu'une des droites prolongeant le tracé entre bien en collision avec le bord suivant, même dans le cas d'une concavité. Le point suivant du tracé peut alors être calculé, en suivant la même procédure que décrit plus tôt.

Le fonctionnement correct face aux concavités repose sur l'utilisation de deux droites pour prolonger le tracé ainsi que sur le positionnement précis des segments de collision, parallèlement et perpendiculairement. D'éventuelles modifications apportées à l'algorithme doivent garantir un comportement correct lorsque des concavités sont rencontrées.

Cette mécanique reste la même dans les itérations suivantes, comme montré dans la Figure 51.

Figure 51 Poursuite du tracé dans un polygone concave jusqu'à complétion



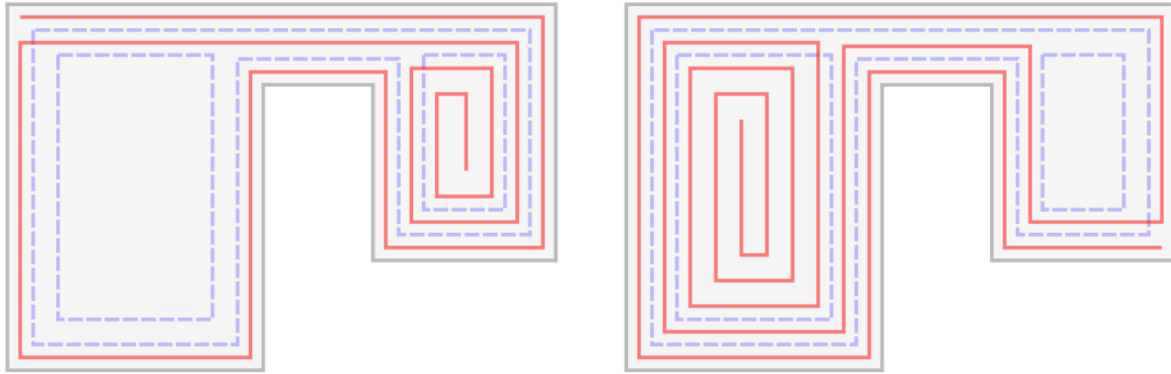
De gauche à droite puis de haut en bas : les itérations 5,10, 11 et le tracé final.

Le comportement de l'algorithme reste régulier, même dans le cas d'une concavité créée par le tracé et non plus par le bord du polygone.

3.1.4.3 Zones non parcourues

Les résultats obtenus avec des polygones convexes et concaves semblent corrects. Il existe cependant des cas particuliers qui peuvent provoquer des problèmes lors du traçage.

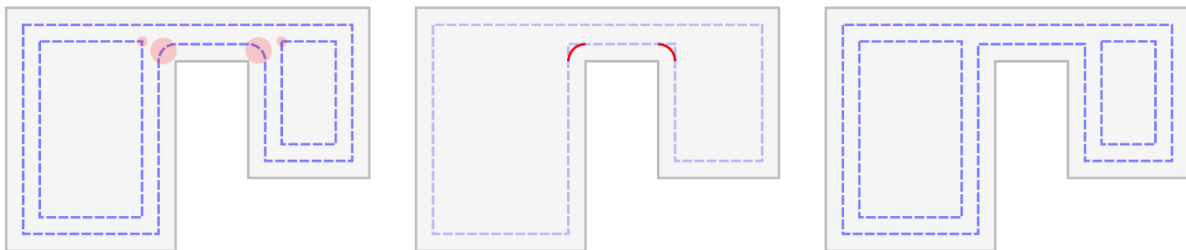
Figure 52 Polygone avec zones non parcourues.



Polygones décalés vers l'intérieur (en bleu pointillé) superposé aux différents tracés possibles d'un polygone concave. Les arcs des polygones décalés ont été retirés.

La Figure 53 permet de constater que les polygones décalés vers l'intérieur correspondent bien aux zones non parcourues. Nous pouvons également remarquer que, puisque le tracé continue jusqu'à ne plus avoir de place, une des zones localisées par le décalage du polygone sera déjà remplie. La zone remplie dépendra du segment de départ choisi.

Figure 54 Correction de polygone décalé intérieur



Décalage de polygone vers l'intérieur et simplification. Gauche : polygones décalés bruts. Milieu : mise en évidence des arcs de cercle d'un des polygones décalés. Droite : polygones décalés sans arcs.

L'algorithme détecte l'emplacement approximatif des zones à remplir de la façon suivante :

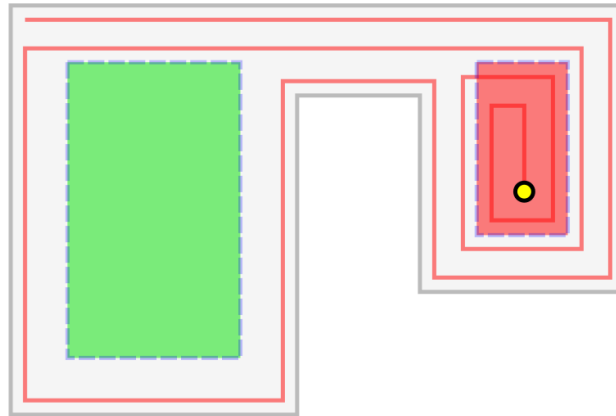
1. Le polygone est tout d'abord décalé vers l'intérieur
2. Dans un deuxième temps, les arcs du ou des polygones obtenus sont retirés
3. Enfin, le nombre de polygones obtenus est examiné :
 - a. Si le décalage intérieur a produit un seul polygone, on retourne à l'étape 1 pour ce polygone.
 - b. Si le décalage intérieur a produit plusieurs polygones, ces polygones sont mémorisés. On retourne ensuite à l'étape 1 pour chaque polygone obtenu.
 - c. Si le décalage intérieur n'a produit aucun polygone, l'algorithme s'arrête.

Cette procédure, lancée sur un polygone concave, retourne soit aucun, soit plusieurs polygones :

- Aucun polygone signifie que le polygone peut être parcouru avec un seul tracé.
- n polygones signifie que n-1 polygones devront être remplis au moyen de tracés supplémentaires.

Si plusieurs polygones ont été trouvés, celui qui est déjà rempli doit être retiré pour éviter de remplir plusieurs fois la même zone.

Figure 55 Détection de zone déjà remplie

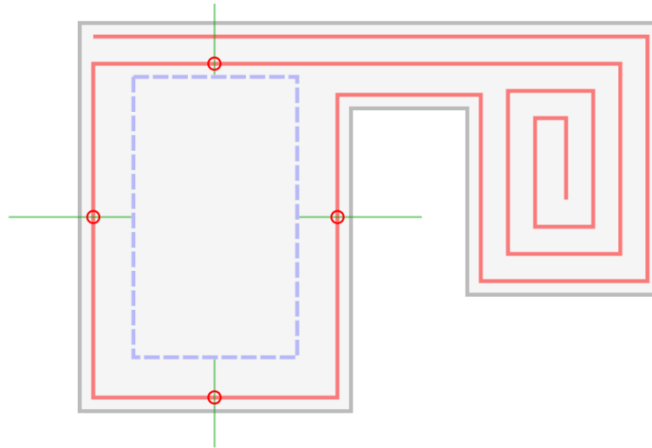


Sous-zones d'un polygone concave. Une zone doit encore être remplie (zone verte), l'autre l'est déjà (zone rouge). Le point final du tracé est en jaune.

La sous-zone déjà parcourue peut facilement être détectée. Il suffit pour cela de déterminer quelle zone contient le dernier point du tracé et de l'exclure. Dans la Figure 55, la zone de droite est exclue car elle contient le point final du tracé (en jaune).

Une fois les sous-zones à remplir identifiées, les médiatrices des segments de la sous-zone sont utilisées afin de trouver les segments du tracé les plus proches. Une fois cet ensemble de segments trouvé, on y sélectionne arbitrairement deux segments consécutifs.

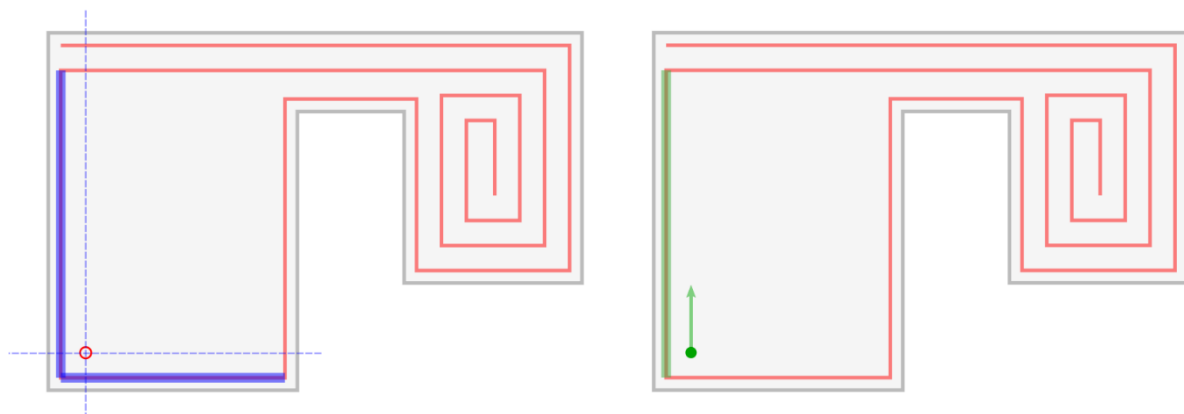
Figure 56 Détection des segments de tracé entourant une zone non parcourue



Détection des segments de tracé les plus proches d'une sous-zone. Les médiatrices (en vert) entrent en collision (cercles rouges) avec les segments trouvés.

Une fois que les deux segments consécutifs ont été trouvés, des droites parallèles à ces segments sont décalées vers l'intérieur. Leur intersection est le point de départ du tracé qui servira à remplir la sous-zone.

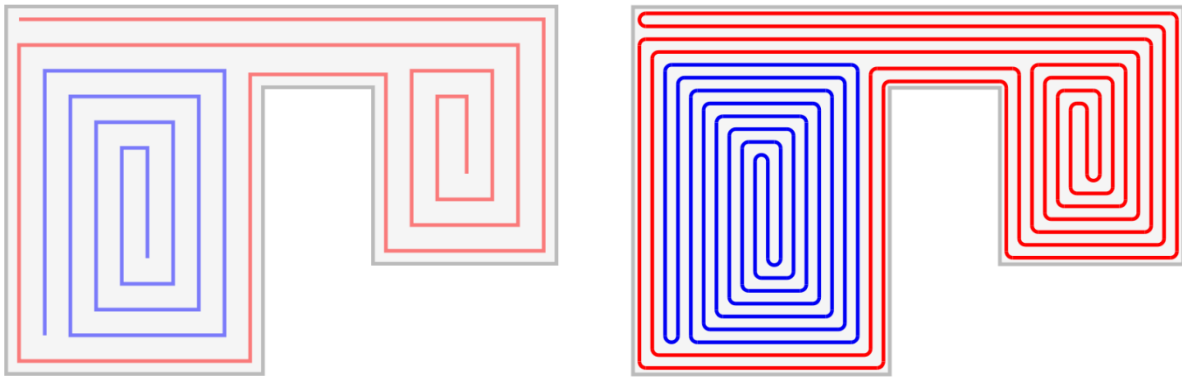
Figure 57 Détermination du point de départ dans une zone non parcourue.



Détermination du point de départ pour remplir une sous-zone. Les deux segments consécutifs (en bleu) sont projetés vers l'intérieur (droites en bleu pointillé). Leur intersection est le point de départ du nouveau tracé.

Une fois le point de départ trouvé, la direction à suivre peut être déduite à partir du deuxième segment. L'algorithme est alors relancé à ce nouvel endroit, avec cette nouvelle direction et ce nouveau segment précédent. L'ensemble des obstacles répertoriés jusqu'à présent est cependant réutilisé.

Figure 58 Deux tracés dans un polygone concave et les chemins de tuyaux résultants



Gauche : deux tracés remplissant un polygone concave. Droite : les parcours de tuyau correspondants.

Une fois l'algorithme réexécuté sur chaque sous-zone, le polygone aura été rempli autant que possible.

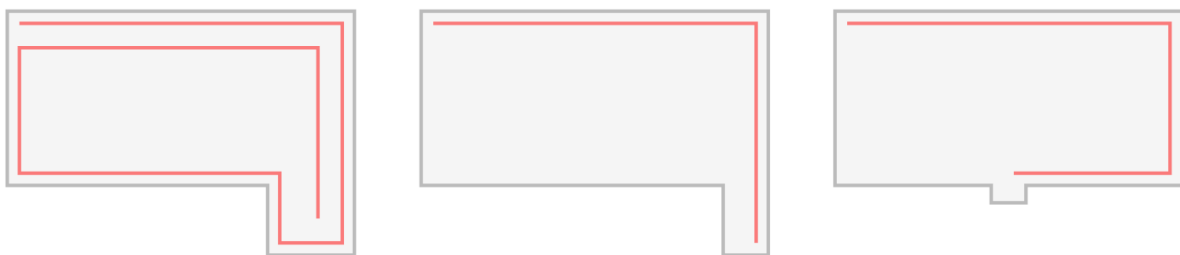
3.1.5 Limitations de l'approche choisie

Bien qu'il existe des cas dans lequel le traçage se déroule correctement, certaines situations spécifiques peuvent produire des résultats indésirables. Ces limitations peuvent être atténuées ou évitées en modifiant le contour du polygone ou en créant plusieurs polygones pour une même zone.

3.1.5.1 Blocage du tracé

Il est possible, si certaines conditions sont réunies, que le tracé se bloque et ne puisse se poursuivre alors que la zone n'est pas encore remplie. Ce cas est à distinguer de celui des zones non parcourues, qui sont gérées grâce aux polygones décalés intérieurs.

Figure 59 Exemples de blocages du tracé



Exemples de polygones provoquant un blocage du tracé. Au départ, le tracé démarre en haut à gauche et va vers la droite.

La Figure 59 montre trois polygones susceptibles de bloquer le tracé. Les deux premiers contiennent des sections étroites qui empêchent le tracé de faire demi-tour.

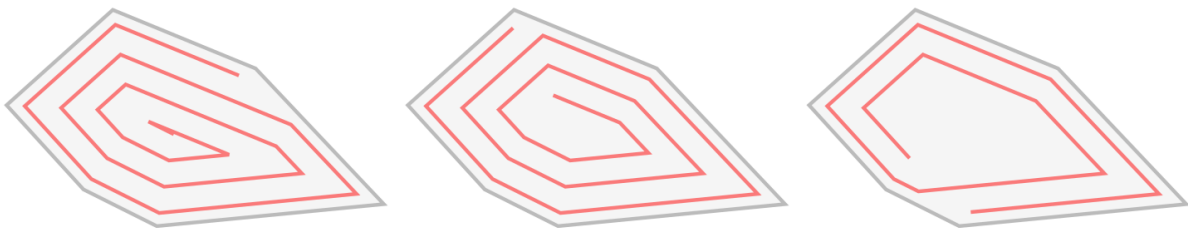
Le troisième contient une zone si petite que le tracé ne peut y entrer. Les concavités provoquant un changement de direction, le tracé enregistre la position à laquelle la concavité a été détectée, essaie de poursuivre depuis cette position mais n'y parvient pas.

Ce genre de problème peut être évité en ne dessinant pas les parties problématiques du polygone. Cette concession ne sera souvent pas un inconvénient, les zones étroites problématiques étant de faible dimension dans la réalité (moins de 30 cm). Dans les autres cas, un polygone supplémentaire devra être dessiné puis parcouru par un tracé que l'on connectera manuellement au premier.

3.1.5.2 Influence du segment de départ

Comme mentionné plus haut, le choix du segment de départ peut avoir une influence sur le résultat retourné.

Figure 60 Variation du tracé en fonction du segment de départ



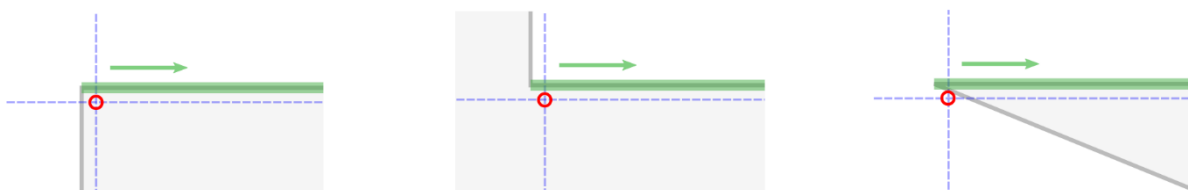
Exemple de polygone provoquant un résultat différent selon le segment de départ.

Ceci se produit lorsque le tracé se retrouve dans une situation où le rayon de courbure ne peut plus être respecté, typiquement lorsque des segments très courts doivent être suivis.

3.1.5.3 Détermination de la position de départ

Le terme *position de départ* désigne ici le premier point du tracé. Actuellement, la position est déterminée uniquement grâce au segment de départ choisi : elle est décalée vers l'intérieur mais également dans la direction du segment à suivre.

Figure 61 Détermination de la position de départ à différents angles



Position de départ depuis un angle droit, un angle concave et un angle aigu.

Dans la plupart des cas, la position de départ peut être utilisée. Cependant, si l'angle de départ est aigu, il se peut que la position soit calculée en dehors du polygone. Dans ce cas, l'algorithme n'est pas lancé.

Ce problème peut être corrigé en déterminant la position de départ par l'intersection de droites décalées vers l'intérieur du polygone.

3.1.6 Implémentation des boucles parallèles

Les boucles parallèles utilisées par OPAL SYSTEMS pourraient être implémentées en paramétrant des espacements (bord à tracé, tracé à tracé) plus grands, et en convertissant le tracé obtenu en plusieurs tracés parallèles qui seraient ensuite convertis en chemin de tuyaux. En d'autres termes, l'algorithme utilisé serait le même, mais lancé avec des paramètres différents et avec une étape supplémentaire de conversion de tracé.

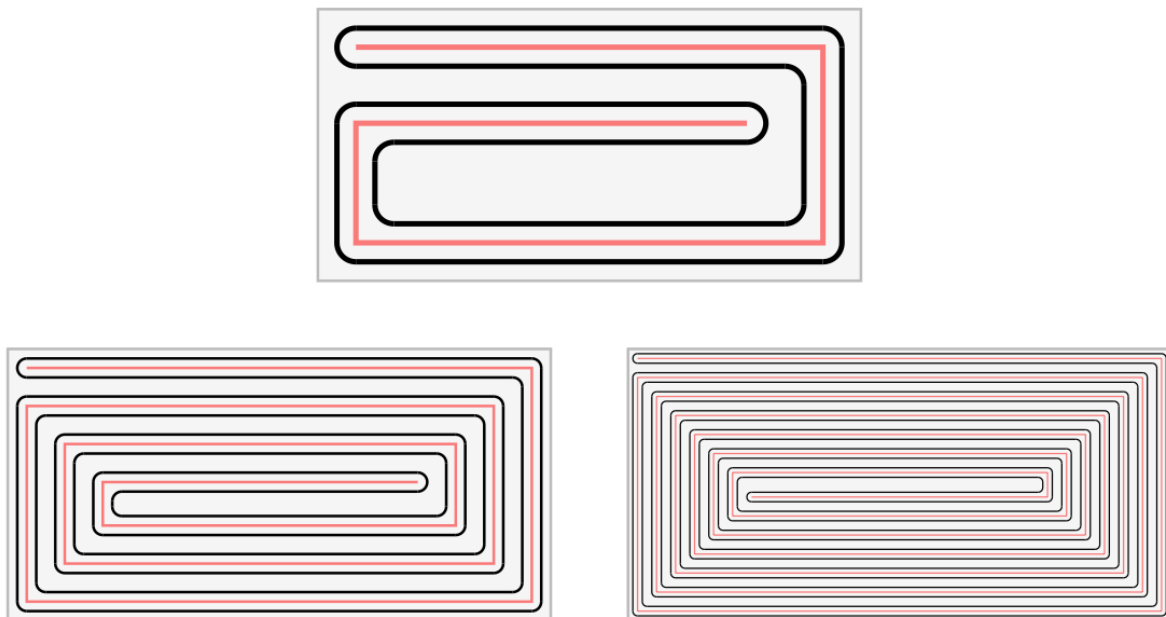
3.1.7 Applications au calepinage des chauffages au sol

3.1.7.1 Mise à l'échelle

La position des polygones dans l'espace 2D n'a aucune influence sur l'algorithme ; en d'autres termes, aucun référentiel spécifique n'est nécessaire pour réaliser le traçage.

Il faut cependant noter que les polygones représentent des espaces réels, avec des dimensions précises. La proportionnalité entre les espacements (bord à tracé, tracé à tracé) et les dimensions du polygone doit donc être correcte.

Figure 62 Variation d'échelle sur le même polygone



Variation des résultats sur le même polygone en faisant varier les espacements. L'épaisseur des traits a été adaptée pour la lisibilité.

Si la proportionnalité n'est pas respectée, le tracé fera un nombre de tour trop petit ou trop grand. De plus, le chemin de tuyau généré ne sera pas à une taille correcte.

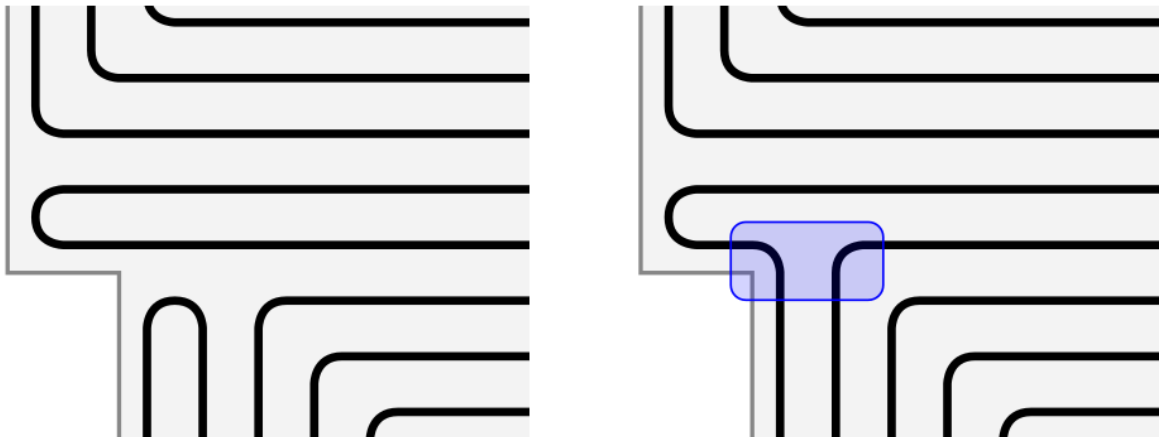
3.1.7.2 Zone de distribution et gestion des boucles

L'algorithme développé dans ce travail a été spécifiquement réfléchi pour les zones à chauffer. Malgré l'existence de certaines limitations, il peut être utilisé pour obtenir un tracé proche de la réalité.

La portion des boucles qui traverse la zone de distribution peut par exemple être représentée par un polygone étroit suivant une zone tracée manuellement par l'utilisateur. Une extrémité du polygone se trouverait à l'emplacement du collecteur, tandis que l'autre se situerait en bordure de la zone à chauffer correspondante. La même stratégie peut être appliquée pour remplir des espaces de faible superficie en bordure de zone.

Une telle stratégie va cependant nécessiter d'associer ces zones afin que le calcul du matériel nécessaire se fasse correctement. En d'autres termes, tous les polygones contenant une portion du tracé de la même boucle devront être groupés. Ceci permettra de faire la somme de tous les segments droits et de tous les arcs de cercle dans le groupe de polygone. Le calcul du matériel nécessaire est expliqué plus loin dans ce document.

Figure 63 Exemple de raccord de tracés

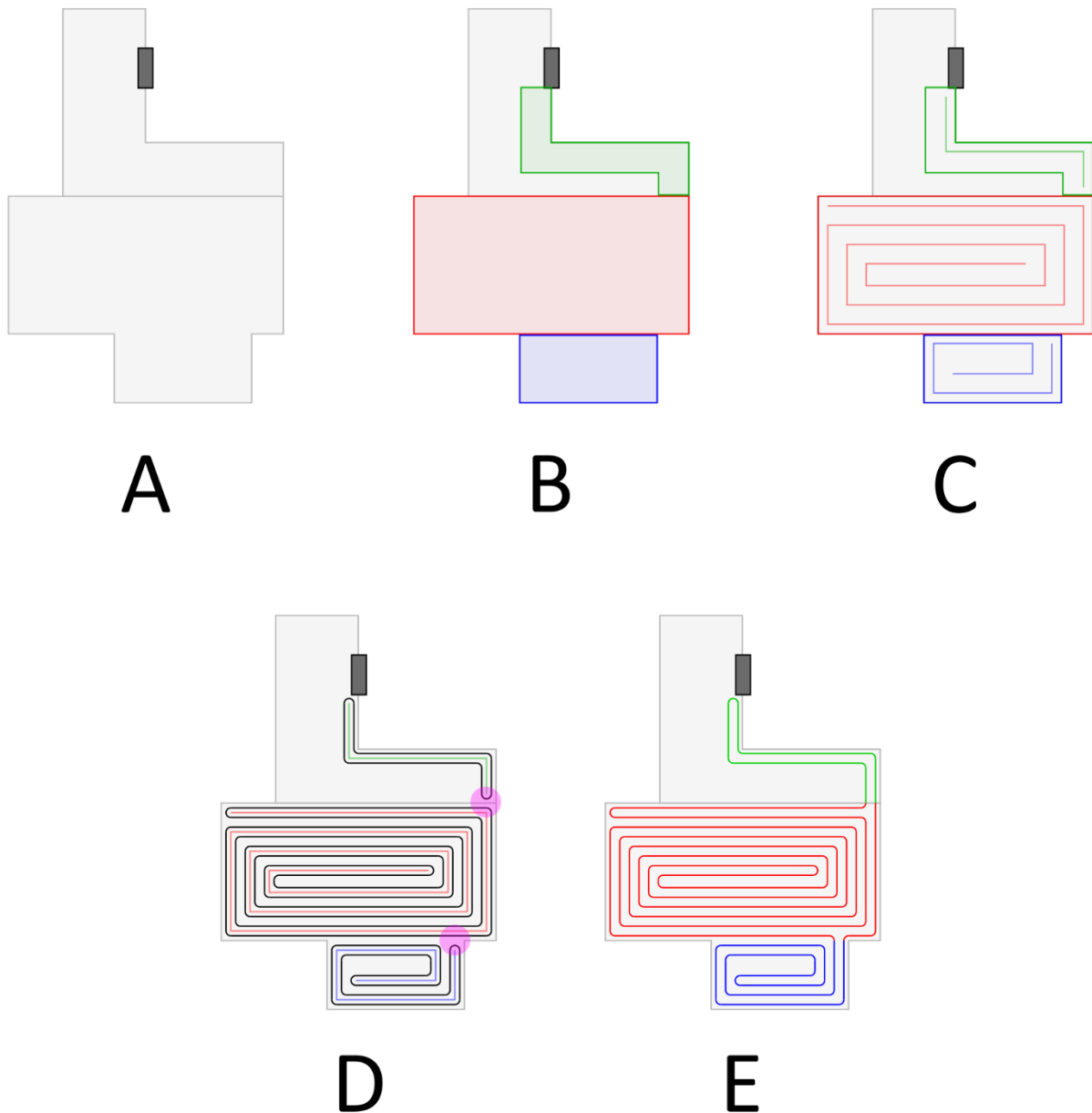


Un exemple de raccord dans un tracé.

Des rectifications manuelles vont également devoir être réalisées manuellement sous AutoCAD pour obtenir un tracé continu. Ces interconnexions de tracés sont déjà utilisées couramment chez OPAL SYSTEMS lors du traçage manuel.

La Figure 64 illustre un cas complet faisant intervenir l'ensemble de ces idées.

Figure 64 Exemple de combinaison des tracés générés pour plusieurs zones



Exemple d'utilisation de l'algorithme sur un cas théorique. Les liaisons de la figure E seraient réalisées manuellement.

Le **schéma A** illustre une situation de départ. La zone du haut représente une zone de distribution (un couloir par exemple), celle du bas une pièce de moins de 15m² chauffable au moyen d'une seule boucle. Le rectangle gris sombre représente un collecteur.

Le **schéma B** met en évidence les polygones que l'utilisateur dessinerait. Le polygone vert représente la portion de la boucle passant par la zone de distribution. Le polygone rouge représente la partie principale de la zone à chauffer. Le polygone bleu représente un petit espace supplémentaire à chauffer. Le polygone bleu est séparé du rouge afin de simplifier le tracé et d'éviter l'apparition de contours qui compliqueraient le tracé.

Le **schéma C** représente les tracés générés automatiquement par l’algorithme dans les trois polygones dessinés.

Le **schéma D** ajoute le parcours des tuyaux aux tracés. À ce stade, il devient possible de calculer le matériel nécessaire pour la pose de la boucle, pour autant que les trois polygones soient groupés ensemble. Les cercles roses indiquent les endroits du tracé qui nécessiteront une rectification manuelle.

Le **schéma E** montre le tracé final. Plusieurs couleurs ont été utilisées pour la lisibilité mais il s’agit bien d’une seule boucle continue.

3.1.7.3 Calcul du matériel nécessaire

Le matériel nécessaire à la pose du système OPAL SYSTEMS comprend les éléments suivants :

- Panneaux droits MDF
- Panneaux virage MDF
- Diffuseur aluminium
- Tuyau PEX-A
- Grillage en aluminium

La quantité de ces différents éléments peut être calculée à partir des valeurs suivantes :

- L’aire des polygones dessinés
- La longueur totale des segments droits du tracé (L_{droit}).
- La longueur totale des segments arcs du tracé (L_{arc})

Les valeurs L_{droit} et L_{arc} peuvent éventuellement être calculées en sommant les tracés de plusieurs polygones groupés.

La quantité de **grillage aluminium** peut être déduite directement de l’aire des polygones.

La somme des longueurs droites et en arc du tracé donne la **longueur du tuyau** :

Équation 1 Longueur totale du tuyau

$$L_{\text{tuyau}} = L_{\text{droit}} + L_{\text{arc}}$$

La **longueur de diffuseur** est égale à la longueur totale des segments droits du tracé, à laquelle on ajoute 1.5 cm pour chaque secteur entier de 45° contenu dans chaque arc. Mathématiquement, la formule suivante s’applique :

Équation 2 Longueur totale de diffuseur

$$L_{diffuseur} = L_{droit} + \sum_{i=1}^n 1.5 \cdot \left\lfloor \frac{a_i}{\pi/4} \right\rfloor$$

Où le tracé du tuyau contient n arcs et a_i est l'angle d'un arc en radians. Il est important d'effectuer cette opération pour chaque arc. Diviser la longueur totale des segments arcs serait incorrect, par exemple dans le cas d'un grand nombre d'arcs inférieurs à 45° ; aucun de ces arcs ne fournirait la place suffisante pour l'insertion d'un diffuseur.

Calculer le **nombre de panneaux MDF** peut se faire en utilisant les longueurs totales de segments droits et d'arcs, les panneaux pouvant être découpés pour être adaptés au tracé. Le nombre de panneaux virages N_{virage} se calcule par une division :

Équation 3 Nombre de panneaux virages

$$N_{virage} = \left\lfloor \frac{L_{arc}}{A_{virage}} \right\rfloor$$

Où A_{virage} est la longueur d'arc disponible sur un panneau virage. Le nombre de panneaux droits N_{droit} se calcule de la même façon mais est influencé par N_{virage} car la longueur de segments droits des panneaux virage peut être utilisée :

Équation 4 Nombre de panneaux droits

$$N_{droit} = \left\lfloor \frac{L_{droit} - (N_{virage} \cdot D_{virage})}{D_{droit}} \right\rfloor$$

Où D_{virage} est la longueur de segments droits d'un panneau virage, et D_{droit} la longueur de segments droits d'un panneau droit. (On peut noter que A_{droit} vaut zéro, le panneau droit ne contenant aucun arc.

3.2 Implémentation

Nous présentons ici une implémentation expérimentale de l'algorithme défini plus haut. Nous examinerons les architectures possibles et déterminerons laquelle semble la plus appropriée.

Nous décrivons ensuite les bibliothèques et outils utilisés pour la technologie choisie, puis nous présenterons le prototype d'interface graphique conçu pour la saisie des polygones.

Enfin, nous réaliserons un calepinage de test et effectuerons une évaluation qualitative des résultats.

3.2.1 Choix de technologie

La technologie choisie pour l'implémentation doit permettre les opérations suivantes :

- Import du plan du chantier
- Mise à l'échelle du plan
- Dessin de polygones au-dessus du plan
- Exécution de l'algorithme (nécessite l'exécution d'opérations géométriques)
- Calcul du matériel nécessaire
- Export du tracé obtenu en DXF

Nous considérerons également des critères tels que l'ergonomie ou la facilité de déploiement. Pour la réalisation de ce prototype, nous avons considéré trois possibilités.

Tout d'abord, il est possible de réaliser l'implémentation via un **plugin AutoCAD**. Un des avantages de cette technologie est la variété des imports possibles ; tous les formats exploités par OPAL SYSTEMS sont pris en charge (PDF, DWG, image). De plus, la saisie de formes géométriques et les opérations géométriques sont des fonctionnalités natives du logiciel AutoCAD auxquelles il est possible d'accéder au moyen d'une API (Application Programming Interface) et d'un SDK (Software Development Kit). Une fois l'algorithme exécuté, aucun export DXF n'est requis puisque la solution fonctionnant directement dans AutoCAD. Enfin, les possibilités ergonomiques offertes aux plugins AutoCAD sont bonnes. Cette solution nécessite cependant une installation sur poste ainsi qu'une licence AutoCAD.

La seconde possibilité est de réaliser une **solution utilisant les technologies web** (HTML, CSS, JavaScript). Le contexte d'exécution étant un navigateur web, l'écriture de fichiers locaux est contraignante : elle existe sur certains navigateurs mais est non standard. Cependant plusieurs avantages tendent à privilégier le web : tout d'abord, l'abondance de bibliothèques JavaScript fournit les outils nécessaires pour le dessin de polygones via le SVG (Scalable Vector Graphics), les opérations géométriques et l'export en DXF. L'image du plan peut être importée par sélection de fichier ou drag-and-drop, l'ergonomie web est bonne et le déploiement extrêmement aisé, une fois la solution installée sur serveur. Il faut également noter que bien que les éléments vectoriels SVG puissent être manipulés via une bibliothèque, le support du SVG est natif dans la majorité des navigateurs. L'affichage, l'interaction utilisateur et l'interaction avec le JavaScript sont aujourd'hui optimisés, temporellement et visuellement.

La dernière possibilité est une implémentation en **application desktop** (exécutable C#, Python, Java...). Ce type de technologie offre un accès complet au système local et permet donc un accès en lecture et en écriture au système de fichiers. L'image du plan peut, par

conséquent, être facilement importée. Des bibliothèques SVG, de géométrie et d'export DXF existent pour la vaste majorité des plateformes. Il faut cependant préciser que l'interaction avec les éléments SVG peut s'avérer moins riche, ergonomique ou performante qu'avec AutoCAD ou les technologies web. Ceci s'explique car cette interaction est gérée exclusivement par les auteurs de la bibliothèque SVG utilisée ce qui implique des équipes et infrastructures de développement moins élaborées que celles d'AutoCAD ou des navigateurs web répandus.

Le Tableau 5 résume les différents points abordés dans notre évaluation des solutions existantes.

Tableau 5 Comparaison d'architectures logicielles

	Plugin AutoCAD	Solution web	Exécutable (C#, Java, Python...)
Licence AutoCAD requise ?	oui	non	non
Import du plan	PDF, DWG, image	Image (par sélection de fichier ou drag-and-drop)	Image (par sélection de fichier)
Dessin de polygones	Fonctionnalité native	Librairie mais API native	Librairie
Opérations géométriques	API native	Librairie	Librairie
Export DXF	Aucun export requis	Librairie	Librairie
Ergonomie	Bonne	Bonne	Moyenne
Déploiement	Installation sur poste	Installation sur serveur	Installation sur poste

Nous précisons ici que le traitement des formats PDF et DWG par des applications web ou desktop est possible via l'utilisation de bibliothèques et en faisant certaines concessions. La conversion d'un DWG en image est également possible en lançant l'AutoCAD Core Console dans un processus séparé. (La Core Console est un exécutable fourni avec l'application

gratuite DWG TrueView, prévue pour la lecture et l'impression (*plotting*) de fichiers AutoCAD DWG et DXF). Ces solutions résultent cependant en des architectures complexes qui ont peu de valeur ajoutée dans notre cas. En comparaison, AutoCAD supporte ces formats nativement et ne requiert aucune mise en place.

Nous pouvons constater que la réalisation d'un plugin AutoCAD constitue la meilleure solution, son seul désavantage étant l'installation sur poste requise pour le déploiement. Cette solution n'a cependant pas été retenue dans le cadre de ce travail, en raison du temps qu'il aurait été nécessaire de consacrer à l'obtention d'une licence académique AutoCAD et à l'apprentissage des technologies spécifiques à utiliser (notamment l'API du SDK d'AutoCAD, ObjectARX®).

Une solution utilisant les technologies web a donc été privilégiée. Ce choix a facilité la réalisation du prototype et le débogage de l'algorithme.

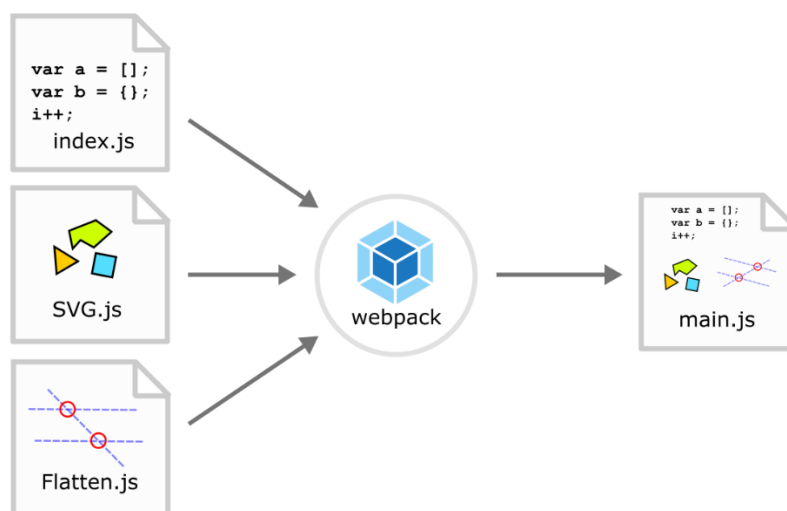
3.2.2 Librairies et outils utilisés

Nous présenterons ici brièvement l'environnement de développement utilisé, les librairies utilisées ainsi que la structure du code.

3.2.2.1 Environnement de développement

Le prototype a été développé en JavaScript, dans l'éditeur **WebStorm** de JetBrains. Les modifications apportées au code source ont été gérées via **GitHub**. Les librairies requises pour le projet ont été gérées avec **npm** (Node Package Manager), le gestionnaire de dépendances JavaScript de l'environnement Node.js.

Figure 65 Fonctionnement de webpack

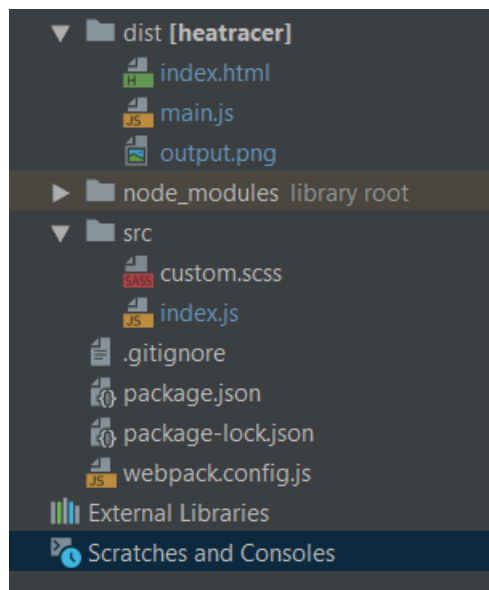


Combinaison des fichiers JavaScript par webpack

À leur compilation, les bibliothèques utilisées durant le projet sont groupées en un seul fichier JavaScript grâce à l'outil **webpack**. Ce groupement est réalisé afin d'éviter le téléchargement de plusieurs fichiers par le navigateur client, ce qui peut ralentir le chargement de la page.

La Figure 66 montre la structure du projet WebStorm utilisé pour gérer le prototype.

Figure 66 Structure du projet WebStorm



La structure du projet WebStorm contenant le prototype

Le code du projet se trouve dans le fichier **index.js** du dossier **src**. Les bibliothèques utilisées sont listées dans le fichier **package.json** (fichier de dépendances pour npm). Les bibliothèques téléchargées sont placées par npm dans le dossier **node_modules**. Enfin, la configuration de webpack se trouve dans **webpack.config.js**.

À la compilation, tous les fichiers du dossier **src** (y compris **custom.scss**) et les bibliothèques JavaScript sont réunis en un seul fichier **main.js** dans le dossier **dist**. Ce fichier est ensuite utilisé par la page web décrite dans **index.html** du dossier **dist**.

3.2.2.2 SVG.js – Saisie de polygones

SVG.js est une bibliothèque JavaScript qui facilite la manipulation des éléments SVG. Elle a été choisie pour ce projet car elle fournissait également un ensemble de plugins aux fonctionnalités intéressantes géométrie (détection d'intersections, sélection de polygones, déplacement de polygones et surtout dessin de polygones).

Au final, la détection d'intersections de SVG.js s'est avérée insuffisante pour l'implémentation de l'algorithme. La sélection et le déplacement des polygones ne sont pour l'instant pas utilisés. Le plugin permettant à l'utilisateur de dessiner des polygones est utilisé.

Afin de pouvoir bénéficier de fonctionnalités géométriques indispensables au projet, la librairie Flatten.js a finalement été utilisée.

3.2.2.3 Flatten.js – Opérations géométriques

L'implémentation de l'algorithme faisant un usage conséquent de concepts géométriques, l'utilisation d'une librairie de géométrie est indispensable.

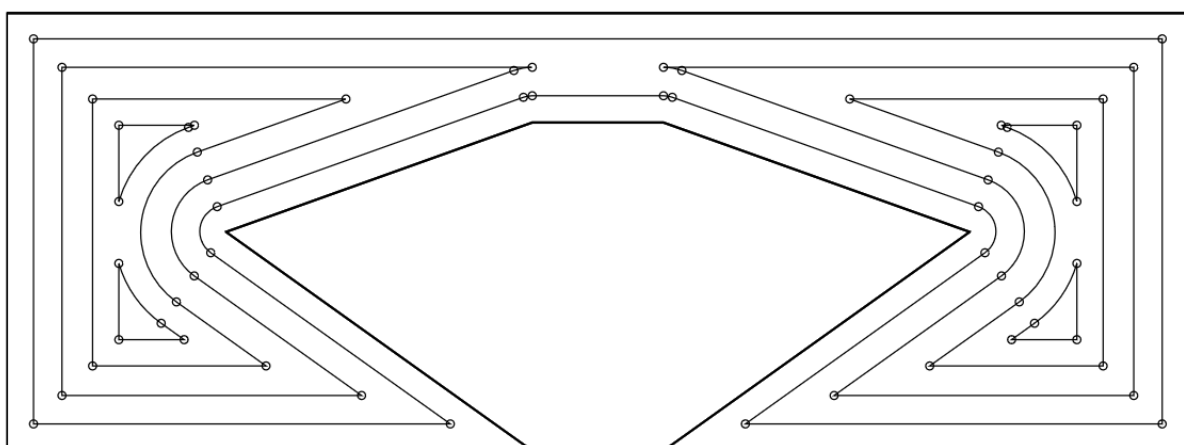
La librairie de géométrie **Flatten.js** fournit un modèle géométrique complet : les polygones sont représentés par un ensemble de faces, lesquelles sont constituées d'arêtes (*edges*) étant soit des arcs, soit des segments de droite (*segments*). D'autres entités existent, telles que les droites (*lines*), les points et les vecteurs (*vectors*).

Flatten.js permet entre autres choses de calculer des distances ou des intersections, de manipuler des vecteurs (somme, multiplication par un scalaire, calcul de l'angle entre deux vecteurs...) ou encore de vérifier si un élément est contenu dans un autre.

De plus, la librairie fournit un module permettant la génération de polygones décalés (intérieur et extérieur). Cependant, ce module n'est pas encore prêt à être utilisé en production. Les polygones décalés sont certes utilisés dans notre algorithme, mais leur exactitude n'est pas critique ; ils servent avant tout à la détection des zones non remplies, pas à générer le tracé.

Nous avons donc choisi de tout de même utiliser ce module, les résultats du code de démonstration nous semblant raisonnablement exploitables.

Figure 67 Plusieurs polygones décalés intérieurs calculés avec Flatten.js



Montage montrant quatre polygones décalés intérieurs produits grâce au plugin d'offset de Flatten.

Nous pouvons observer que les polygones intérieurs sont générés correctement, y compris dans les cas où un polygone décalé se décompose en plusieurs parties. Nous pouvons

constater l'apparition d'arcs de cercles autour des points concaves du polygone. Il s'agit d'un comportement tout à fait standard dû à la contrainte de respecter l'espacement souhaité en tout point du contour.

Après avoir réalisé quelques tests de décalage de polygone, nous avons constaté que l'algorithme utilisé ne semble fonctionner correctement qu'à deux conditions :

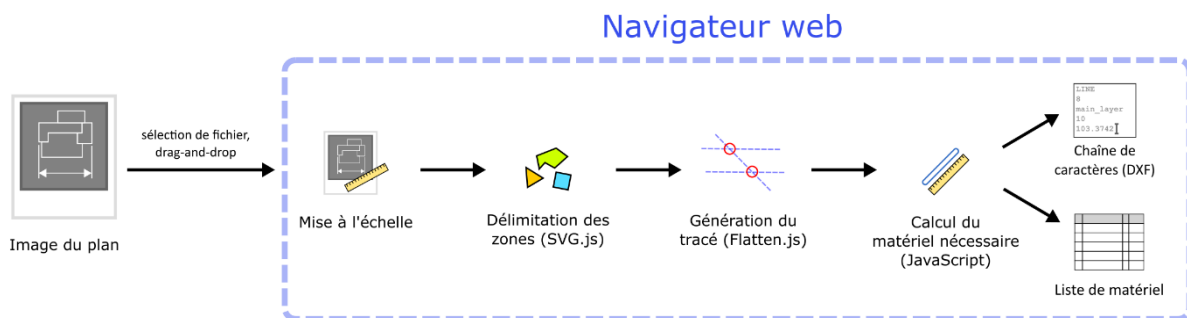
1. Le polygone doit être tracé dans le sens horaire (*clockwise orientation*)
2. Le polygone ne contient pas d'angle plat (trois points consécutifs et alignés)

Une fois ces conditions remplies, les résultats retournés étaient corrects.

3.2.3 Interface graphique et fonctionnalités

L'utilisation du prototype passe par différents stades, présentés dans la Figure 68. Nous décrivons plus bas chacune des fonctionnalités clés plus en détails.

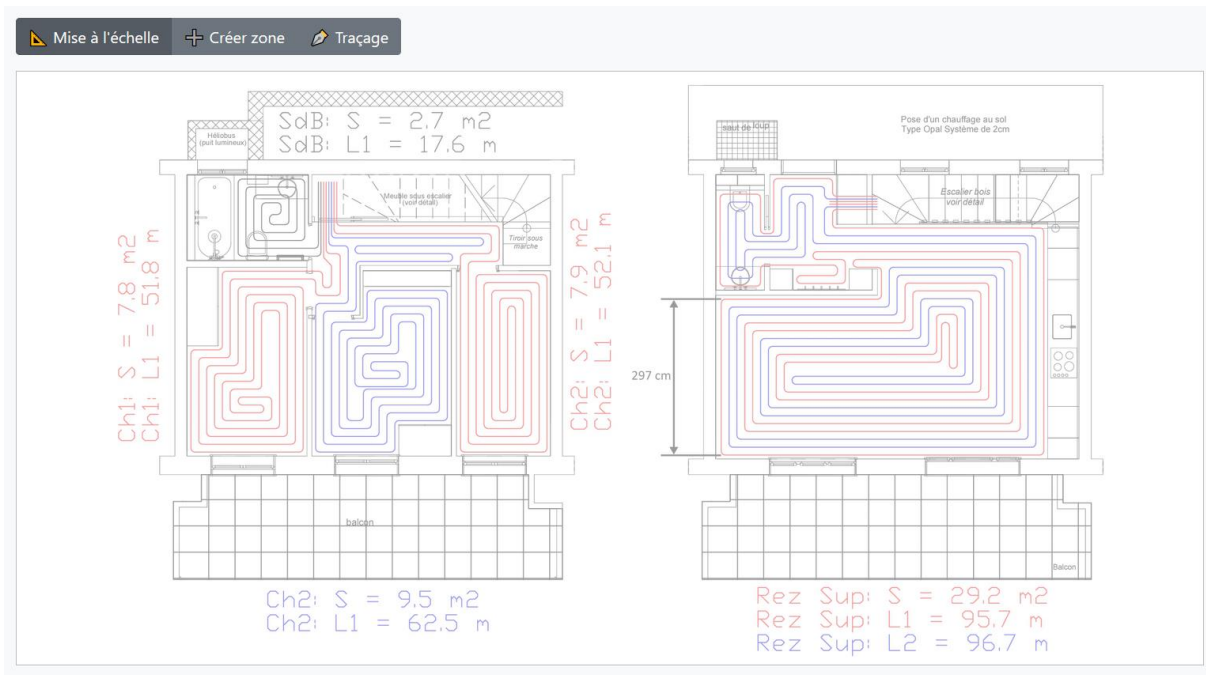
Figure 68 Fonctionnalités du prototype



3.2.3.1 Import de l'image du plan

L'image du plan peut être importée en faisant un glisser-déposer dans la fenêtre du navigateur.

Figure 69 Zone de dessin SVG après dépôt d'une image



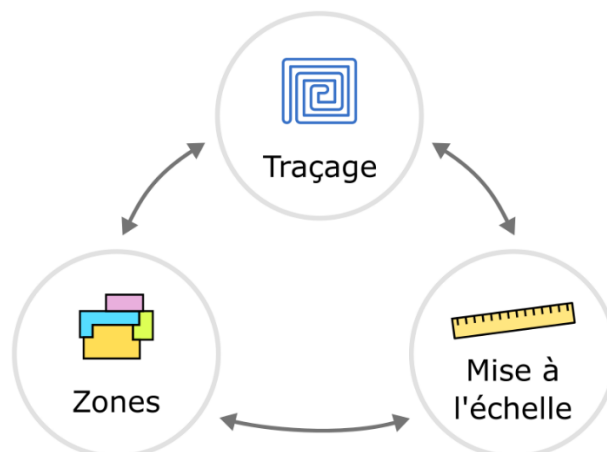
La zone de dessin, juste après le dépôt d'un fichier image.

Il serait également possible de sélectionner un fichier avec le sélecteur standard du système d'exploitation. Une fois l'image importée, elle apparaît en fond du document SVG principal. L'image est légèrement translucide pour améliorer la visibilité des annotations.

3.2.3.2 Modes possibles

Le prototype permet de transiter entre trois modes différents : la mise à l'échelle, l'ajout de zones et le traçage.

Figure 70 Modes possibles du prototype

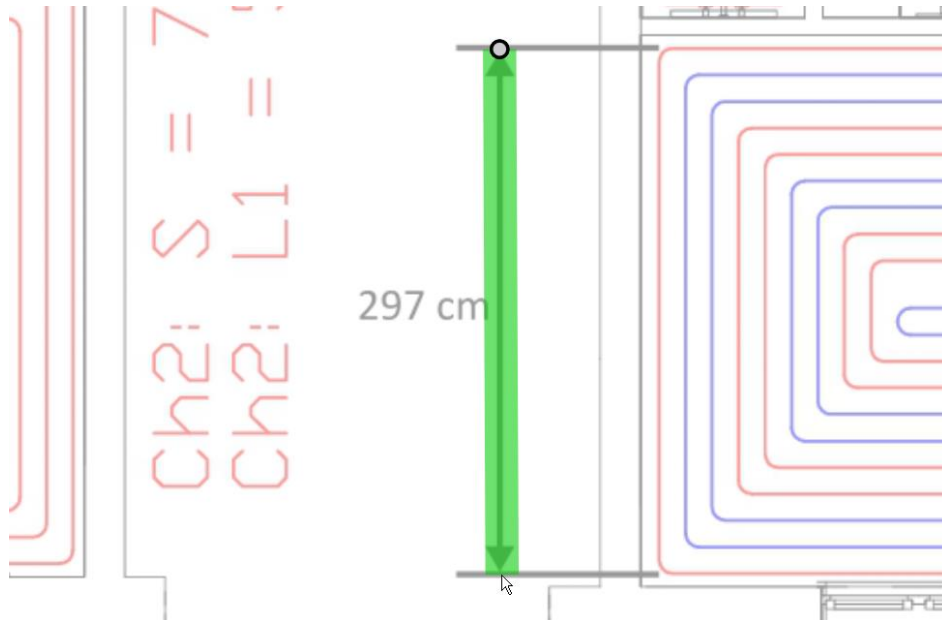


Les trois modes disponibles dans le prototype.

3.2.3.2.1 Mode mise à l'échelle

Le mode de mise à l'échelle sert à informer le logiciel sur la proportionnalité entre les distances du modèle et les distances réelles représentées sur le plan. Pour mettre à l'échelle, l'utilisateur clique sur les deux extrémités d'une des cotations du plan.

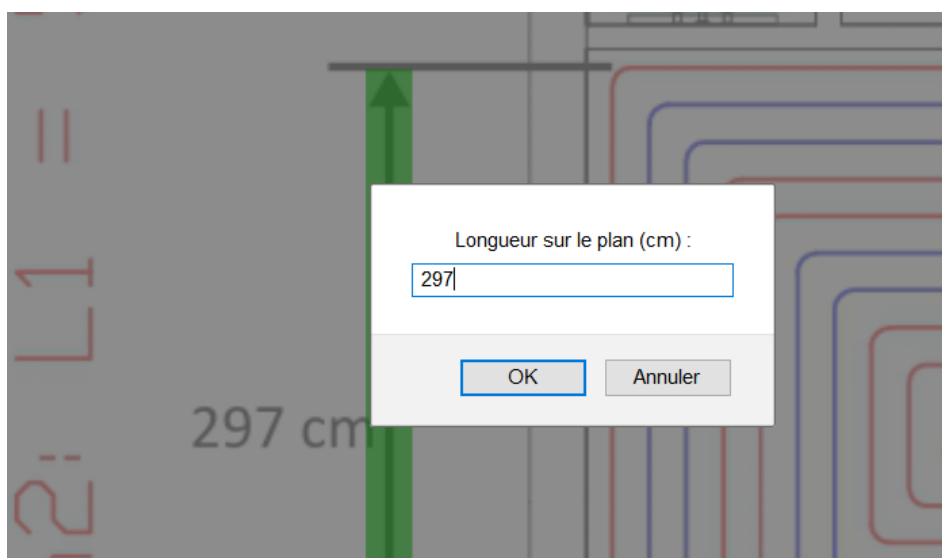
Figure 71 Clic sur une cotation pour la mise à l'échelle



Clic sur une cotation du plan pour effectuer la mise à l'échelle.

Une fois le deuxième clic effectué, l'utilisateur saisit la dimension décrite sur le plan en centimètres.

Figure 72 Saisie de la valeur de la cotation



Saisie de la dimension inscrite sur le plan.

Une fois ce ratio saisi, il influence les espacements du tracé, le calcul des aires des polygones et les longueurs arcs et segments des panneaux MDF.

Figure 73 Extraits de code faisant intervenir la mise à l'échelle

```
// Updating steps
realCmToModelCmRatio = (segment.length / cm);
bound_step = 15 * realCmToModelCmRatio;
step = 30 * realCmToModelCmRatio;
```

```
// Converting area from model cm2 to real m2
var modelAreaToRealArea = (1/realCmToModelCmRatio) * (1/realCmToModelCmRatio);
var area_m2 = (area_model_cm2 * modelAreaToRealArea) / (100*100);
```

```
// MDF panel length capacities (REAL lengths in centimeters)
// (values computed from OPAL SYSTEMS diagram)
var STRAIGHT_PANEL_SEGMENT_LENGTH = 488;
var STRAIGHT_PANEL_ARC_LENGTH = 0;
var TURN_PANEL_SEGMENT_LENGTH = 421.75942;
var TURN_PANEL_ARC_LENGTH = 47.1238898;

// MDF panel length capacities (MODEL lengths in centimeters)
var straight_panel = {
  segment_length: STRAIGHT_PANEL_SEGMENT_LENGTH * realCmToModelCmRatio,
  arc_length: STRAIGHT_PANEL_ARC_LENGTH * realCmToModelCmRatio
};

var turn_panel = {
  segment_length: TURN_PANEL_SEGMENT_LENGTH * realCmToModelCmRatio,
  arc_length: TURN_PANEL_ARC_LENGTH * realCmToModelCmRatio
};
```

```
console.log(' Segment length: ' + metrics.segment_length * (1/realCmToModelCmRatio) );
console.log(' Arc length: ' + metrics.arc_length * (1/realCmToModelCmRatio) );
console.log(' Total loop length: ' + metrics.total_loop_length * (1/realCmToModelCmRatio) );
console.log(' Diffuser length: ' + metrics.diffuser_length * (1/realCmToModelCmRatio) );
```

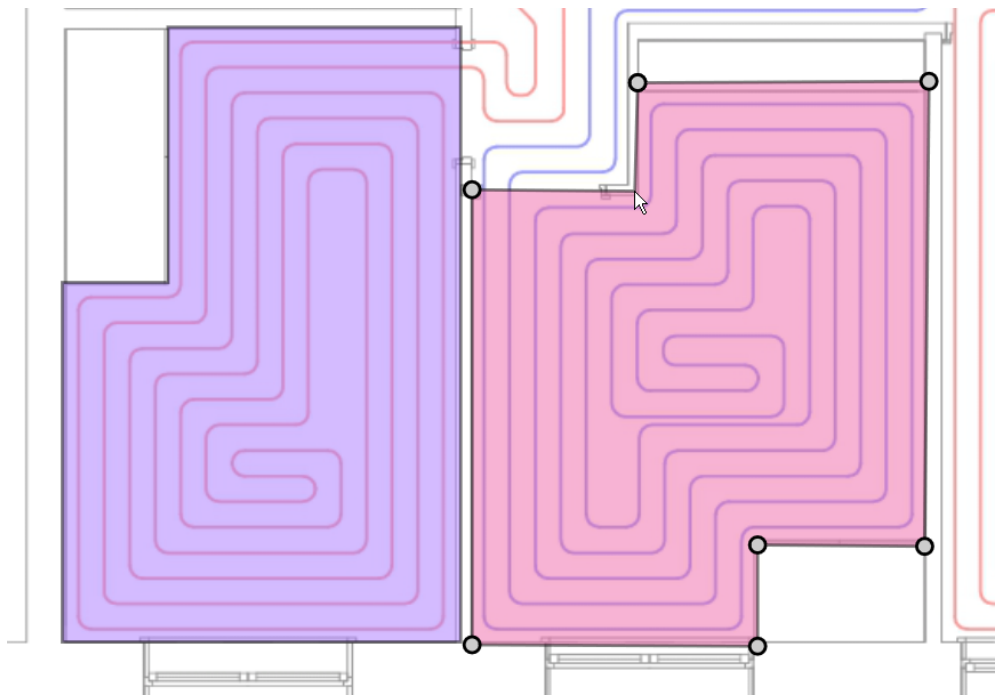
Les sections du code influencées par la mise à l'échelle (espacements du tracé, aires des polygones, longueurs des panneaux (arcs et segment), affichage des mesures).

Une fois la mise à l'échelle effectuée, l'utilisateur peut passer en mode zones pour délimiter les zones à chauffer.

3.2.3.2.2 Mode zones

Le mode zones permet à l'utilisateur de dessiner des polygones pour délimiter les zones à chauffer.

Figure 74 Délimitation de zones



Délimitation de zones par-dessus le plan.

Une fois les zones tracées, elles s'ajoutent dans une liste qui affiche leur nom et leur aire.

Figure 75 Liste des zones

	Zone 1	7.49 m ²
	Zone 2	7.58 m ²

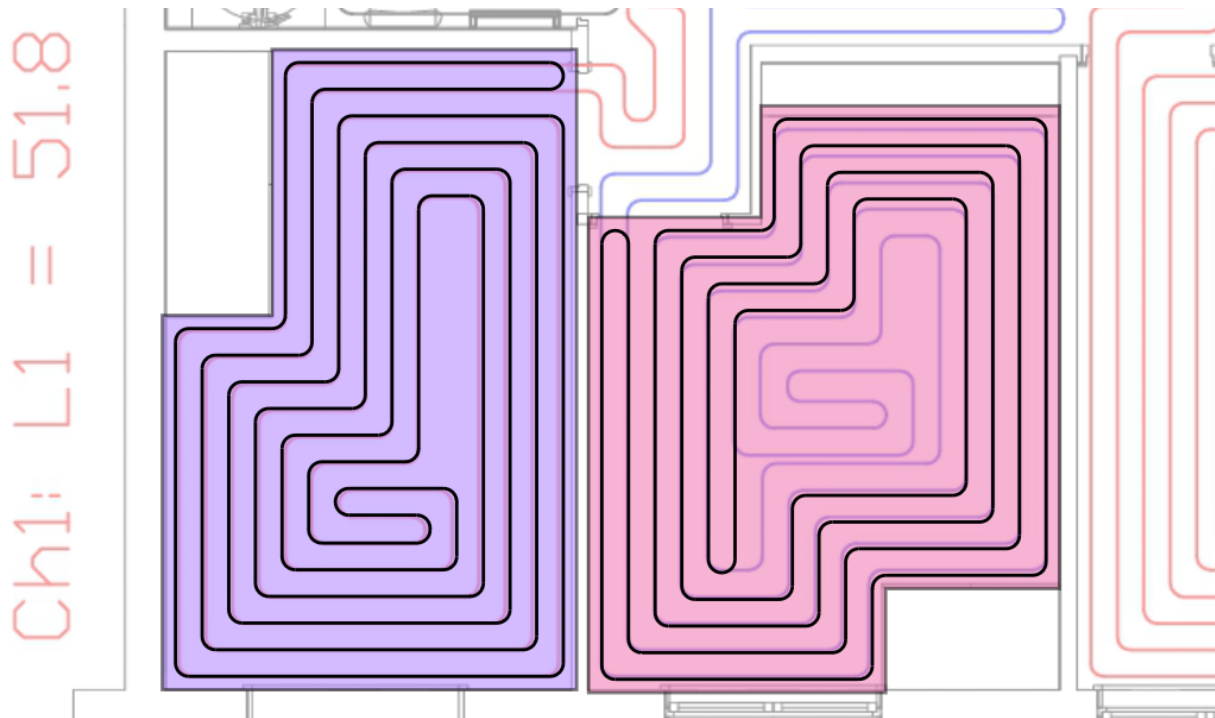
La liste des zones et leurs aires.

Une fois les zones délimitées, l'utilisateur peut passer en mode traçage pour générer les chemins des tuyaux.

3.2.3.2.3 Mode traçage

Le mode traçage affiche les chemins des tuyaux par-dessus les zones à chauffer pour que l'utilisateur puisse avoir une idée du calepinage généré.

Figure 76 Chemins de tuyau générés superposés aux zones et au plan



Les chemins de tuyaux générés au-dessus des zones à chauffer.

3.2.3.3 Calcul du matériel

Une fois le traçage effectué, le logiciel calcule les différentes données voulues par l'utilisateur. Les données retournées sont présentées dans la Figure 77.

Figure 77 Données retournées par l'algorithme

--- Metrics for Zone 1	--- Metrics for Zone 2
Segment length: 2217.66846526753	Segment length: 1891.4093481844134
Arc length: 250.40425280290376	Arc length: 225.36382752261338
Total loop length: 2468.0727180704334	Total loop length: 2116.773175707027
Diffuser length: 2297.66846526753	Diffuser length: 1963.4093481844134
Total Flatten elements: 76	Total Flatten elements: 68
Straight panel count: 0	Straight panel count: 0
Turn panel count: 11	Turn panel count: 10

Les différentes valeurs calculées pour deux zones.

Chaque zone dispose de ses propres valeurs, en centimètres. Celles-ci comprennent :

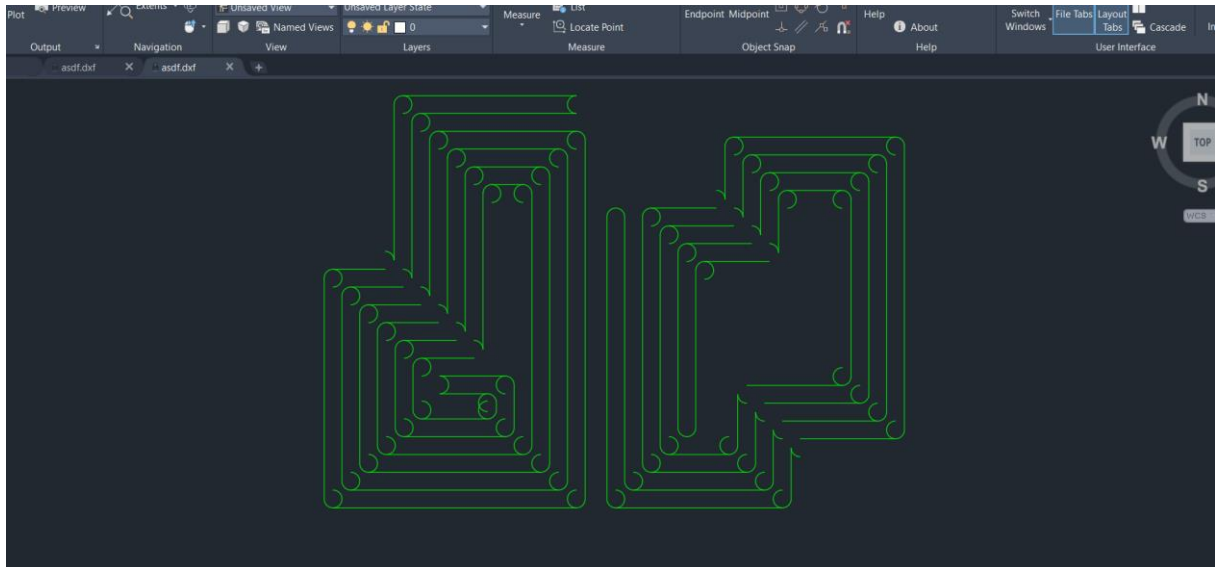
- La longueur totale des lignes droites du tracé (segment length)
- La longueur totale des lignes en arc du tracé (arc length)
- La longueur totale de la boucle dans la zone (total loop length) qui correspond à la longueur du tuyau
- La longueur totale du diffuseur en aluminium nécessaire (diffuser length)

- Le nombre de panneaux droits requis (straight panel count)
- Le nombre de panneaux virages requis (turn panel count)

3.2.3.4 Export du tracé en DXF

L'utilisateur peut générer le code DXF censé correspondre aux tracés calculés. Une fois ce code inséré dans un fichier avec l'extension **.dxf**, le tracé peut être lu dans AutoCAD, Autodesk DWG TrueView etc.

Figure 78 Calepinage importé dans Autodesk DWG TrueView



Des tracés exportés en DXF et lus dans Autodesk DWG TrueView. Les arcs ne sont pas convertis correctement.

Comme cela peut être constaté dans la Figure 78, l'export du tracé par le prototype ne se fait pas correctement. Ceci est dû à une différence dans la façon de définir les arcs entre Flatten.js et le standard DXF conçu par Autodesk. Nous pouvons par exemple remarquer que les points de début et de fin des arcs ont le bon angle. Cependant le tracé est parfois effectué du côté opposé ou avec un décalage de 90° .

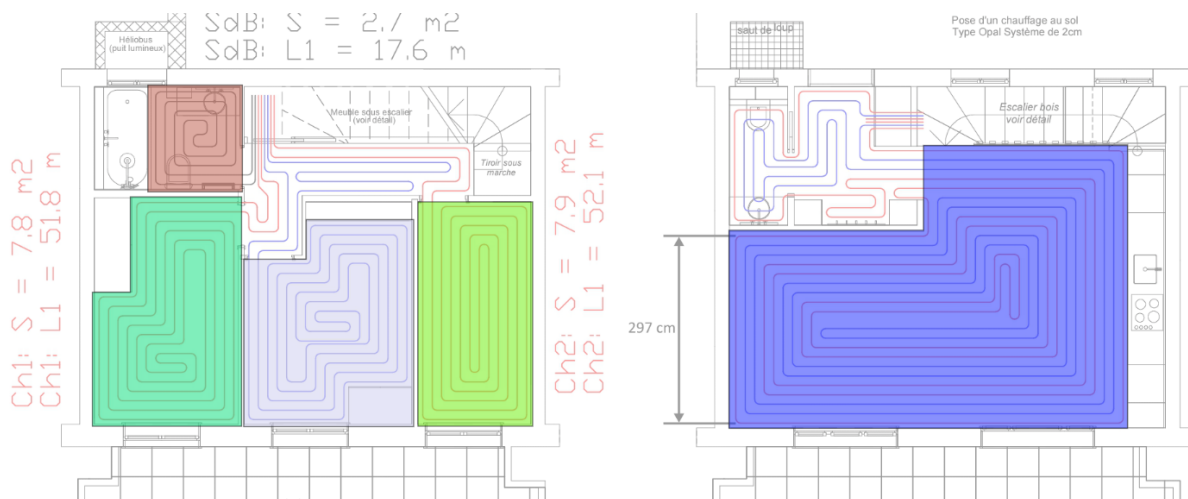
Ce problème peut être corrigé en effectuant la conversion appropriée.

4 Résultats

Afin d'évaluer l'utilisabilité de l'algorithme dans un cas concret, un calepinage automatisé a été réalisé sur un cas traité manuellement. Les résultats obtenus pourront ainsi être comparés avec la réalité.

Le plan du calepinage de test contient cinq zones différentes. La Figure 79 montre les délimitations de zones utilisées pour le calepinage de test.

Figure 79 Les cinq zones du calepinage de test



Les cinq zones du calepinage de test.

Dans le cadre de ce test, **la zone de distribution est ignorée**. De plus, la zone 5 (zone bleue de droite) sera **parcourue par une seule boucle**, les boucles parallèles n'étant pas implémentées.

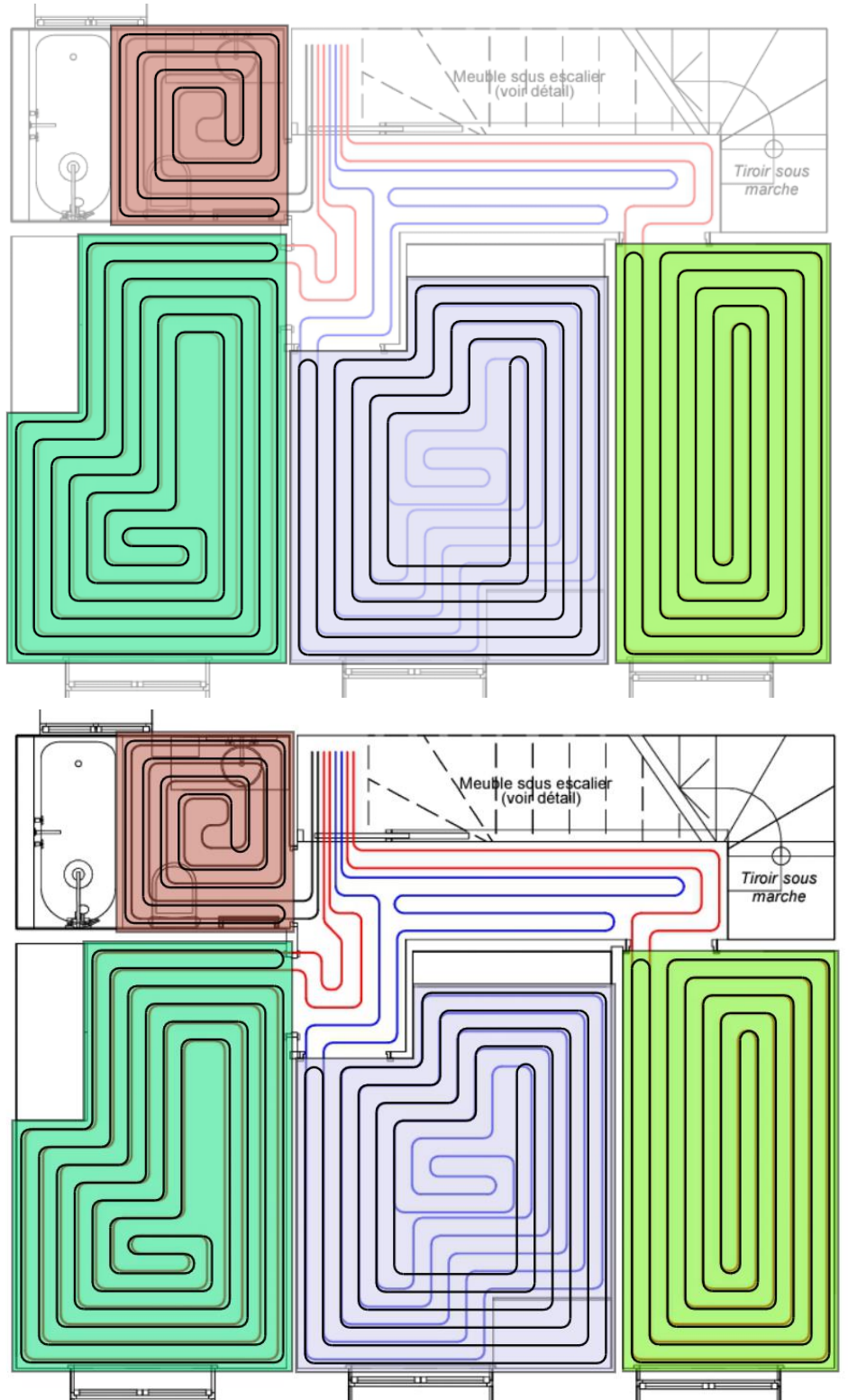
La Figure 80 montre l'aire calculée pour ces zones ainsi que leurs noms. La Figure 81 et la Figure 82 montrent les chemins de tuyaux obtenus, avec un contraste faible et élevé.

Figure 80 Liste des zones avec noms et aires

● Zone 1	7.62 m ²
● Zone 2	2.51 m ²
● Zone 3	8.14 m ²
● Zone 4	6.41 m ²
● Zone 5	23.97 m ²

Les noms des zones de test avec leurs aires.

Figure 81 Calepinage de test pour les zones 1 à 4



Le calepinage obtenu pour les zones 1 à 4, avec un contraste faible (haut) et élevé (bas).

Le Tableau 6 montre les chiffres obtenus durant le test effectué. Les colonnes **Modèle** sont les valeurs calculées par l’algorithme. Les colonnes **Réalité** sont les chiffres réels.

Tableau 6 Comparaison des résultats du modèle avec la réalité

	Longueur de tuyau [m]		Longueur diffuseur [m] de		Panneaux droits [-]		Panneaux virages [-]		Grillage aluminium [m ²]	
	Modèle	Réalité	Modèle	Réalité	Modèle	Réalité	Modèle	Réalité	Modèle	Réalité
Zone 1 Chambre gauche	46.888	51.8	43.673	?	0	?	11	?	7.62	7.8
Zone 2 Salle de bains	15.227	17.6	13.781	?	0	?	5	?	2.51	2.7
Zone 3 Chambre milieu	45.742	62.5	43.171	?	1	?	9	?	8.14	9.5
Zone 4 Chambre droite	41.807	52.1	39.878	?	2	?	7	?	6.41	7.9
Zone 5 Rez-de-chaussée	153.079	192.4	148.096	?	17	?	16	?	23.97	29.2
TOTAL	302.743	376.5	288.599	348	20	18	48	60	48.65	57

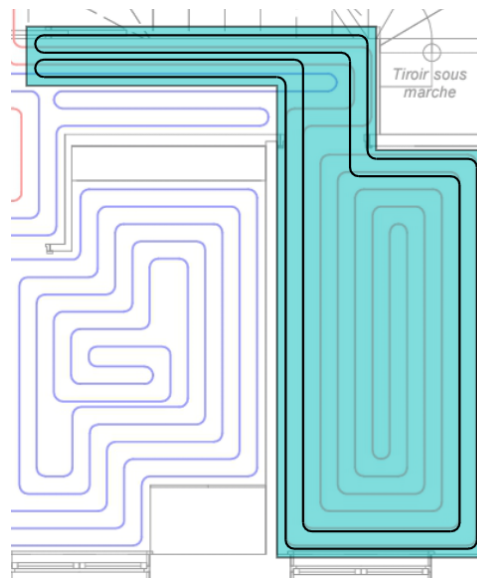
5 Interprétation des résultats

Les résultats obtenus grâce à notre modèle diffèrent significativement des valeurs réelles. Les différences sont les suivantes :

- Le modèle donne **73.7 m** de moins par rapport à la réalité
- Le modèle donne **59.4 m** de moins par rapport à la réalité
- Le modèle donne **2 panneaux droits** de plus par rapport à la réalité
- Le modèle donne **12 panneaux virages** de moins par rapport à la réalité
- Le modèle donne **8.35 m²** de moins par rapport à la réalité

Ces variations importantes peuvent s'expliquer par plusieurs raisons. La première d'entre elles est **l'exclusion des zones de distribution**. Les chiffres réels sont en effet calculés en incluant les zones de distribution pour lesquels nous n'avons pas défini d'algorithme. Il faut ici préciser que l'algorithme actuel se comporte mal sur les sections étroites ce qui nous a empêché d'inclure davantage d'espace dans la zone à chauffer.

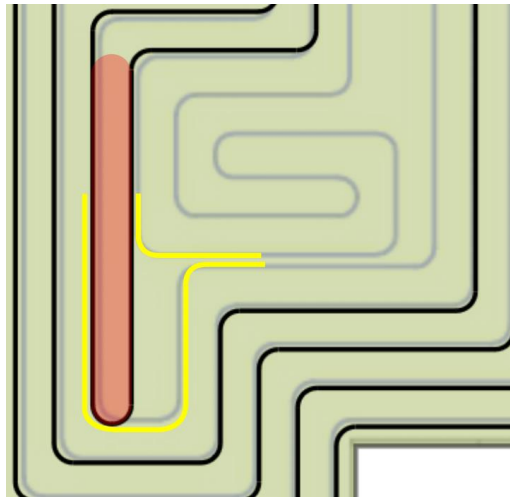
Figure 83 Blocage du tracé après inclusion de la partie distribution de la boucle



Exemple de blocage de l'algorithme lors de l'inclusion de la partie distribution d'une boucle (l'algorithme a été relancé sur une version étendue de la zone 4).

Une seconde raison aux différences observées est l'incapacité de l'algorithme à adopter des **changements de parcours spécifiques**.

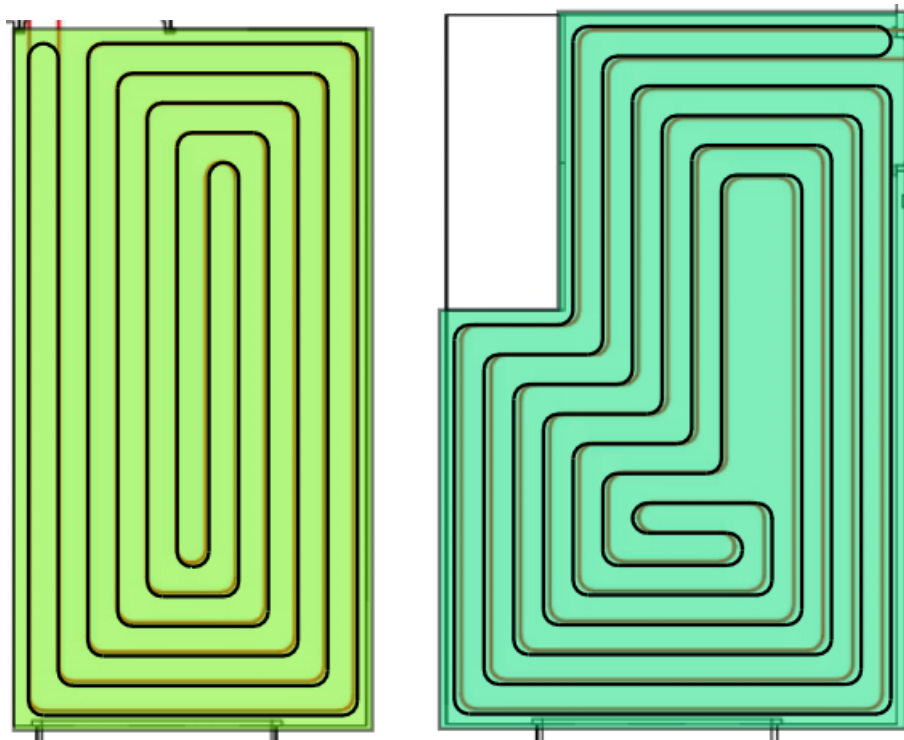
Figure 84 Parcours irrégulier non suivi par l'algorithme



Un changement de parcours irrégulier (l'algorithme a été relancé sur la zone 3). En rouge, la boucle de l'algorithme. En jaune le trajet tracé manuellement.

Cependant, la teneur de certains parcours est quasiment identique à la réalité. Les zones 1 et 4 de notre cas de test en sont un bon exemple.

Figure 85 Bonne correspondance des zones 1 et 4 du calepinage de test



Les zones 1 et 4 du calepinage de test. Dans les cas standards, les parcours se superposent presque parfaitement.

Enfin, les différences des totaux de matériel résultent en partie **d'une accumulation d'erreurs moins importantes** sur chaque zone. Cela reste dommageable, les totaux de matériel étant la principale information utilisée pour préparer le matériel du chantier. Cependant, l'intégration aux étapes précédentes et suivantes du processus d'entreprise

(import d'une image du plan, export en DXF) ainsi que la mise à l'échelle du plan ont bien fonctionné en tant que concept, même si des erreurs restent à corriger. La mise à l'échelle a notamment produit des tracés précis.

6 Conclusion

Le résultat de notre recherche a abouti à un prototype s'intégrant, en théorie, correctement dans le processus d'entreprise d'OPAL SYSTEMS. Nous avons pu observer que l'algorithme défini fonctionne dans des cas simples. Les parcours étroits posent cependant problème. De plus, l'exclusion des zones de distributions a une influence trop importante sur les résultats retournés pour être négligée. Enfin, la gestion de la limite de longueur des boucles, les parcours irréguliers et le traçage utilisant des boucles parallèles restent à implémenter.

De manière générale, l'approche choisie pour la réalisation de cet algorithme (réalisation du tracé étape par étape, par détection de collisions) a engendré des problèmes spécifiques qui ont dû être gérés (tracé bloqué, zones non remplies, gestion des obstacles etc.) et ont compliqué l'implémentation. Les résultats observés ne sont cependant pas suffisants pour invalider notre hypothèse de départ (le gain de temps par l'automatisation du calepinage) et nécessitent d'effectuer davantage de recherches.

Considérant les problèmes rencontrés, une approche générant le tracé directement à partir des polygones décalés intérieurs vaudrait la peine d'être examinée car elle ne provoquerait pas de blocage du tracé ni l'apparition de zones non remplies. L'intérêt de cette idée se justifie également par le fait qu'elle est utilisée en production dans le logiciel HeatingDesign de TiSoft. Elle demanderait cependant une gestion extrêmement précise du raccord en spirale des polygones décalés intérieurs. Si cet assemblage est géré correctement, cette approche peut potentiellement produire de meilleurs résultats que ceux obtenus dans ce travail.

7 Références

- Abrahamsen, M. (2019). Spiral tool paths for high-speed machining of 2D pockets with or without islands. *Journal of Computational Design and Engineering*, pp. 105-117.
- Avenir Software Inc. (s.d.). *How can I draw circuits in a counterflow or reverse-return pattern?* Consulté le Juillet 28, 2019, sur www.avenir-online.com: <http://www.avenir-online.com/AvenirWeb/Support/FAQs/LoopCAD17/ReverseReturn.aspx>
- Chapman, K., & Shultz, J. (2002). *Develop Simplified Methodology to Determine Heat Transfer Design Impacts Associated with Common Installation Alternatives for Radiant Conduit*. Manhattan: National Gas Machinery Laboratory. Kansas State University.
- Chen, X., & McMains, S. (2005). *POLYGON OFFSETTING BY COMPUTING WINDING NUMBERS*. Long Beach: ASME 2005 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference.
- Dharmendra, D. P., & Lalwani, D. I. (2015). A spiral toolpath for machining of elliptical pockets using partial differential equation. *Materials Today: Proceedings*, pp. 3394-3402.
- ETU Software GmbH. (s.d.). *TGA Heating 3D PLUS*. Consulté le Juillet 30, 2019, sur [ETU-Software.com](https://www.etu-software.com): <https://www.etu-software.com/M/SOFTWARE/Building-Services-Engineering/TGA-Heating/Seite.html,154171,96625>
- Held, M., & de Lorenzo, S. (2018). On the generation of spiral-like paths within planar shapes. *Journal of Computational Design and Engineering*, pp. 348-357.
- Karlsson, H. (2006). *Thermal system analysis of embedded building integrated heating*. Göteborg: Department of Civil and Environmental Engineering. CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY.
- Karlsson, H. (2010). *Thermal Modelling of Water-Based Floor Heating Systems*. Göteborg: Department of Civil and Environmental Engineering. CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY.
- Lee, E. S. (2013). *AN IMPROVED HYDRONIC LOOP SYSTEM SOLUTION ALGORITHM WITH A ZONE-COUPLED HORIZONTAL GROUND HEAT EXCHANGER MODEL FOR WHOLE BUILDING ENERGY SIMULATION*. Stillwater: Oklahoma State University.

- Manuel, D., Liang, M., & Kolahan, F. (1996). A Dynamic Offsetting Approach to Tool Path Generation for Machining Convex Pockets. *Computers & Industrial Engineering*, pp. 135-138.
- Mishra, S. K., Bajracharya, T. R., & Bhattarai, R. N. (2017). Design and Numerical Analysis of Solar Underfloor Heating System : A Case Study of Resort in Nagarkot, Nepal. *Proceedings of IOE Graduate Conference*, pp. 529-536.
- Mladenovic, G. M., Tanovic, L. M., & Ehmann, K. F. (2014). *Tool Path Generation for Milling of Free Form Surfaces With Feedrate Scheduling*. Belgrade: Faculty of Mechanical Engineering.
- OPAL SYSTEMS. (s.d.). *Technologie*. Consulté le Juillet 28, 2019, sur opal-systems.be: <http://www.opal-systems.be/fr/technologie/>
- REHAU. (s.d.). *RAUCAD*. Consulté le Juillet 30, 2019, sur REHAU.com: <https://www.rehau.com/en-en/micropages/design-service-en/building-technology/raucad>
- Sanaye, S., Mahmoudimehr, J., & Aynechi, M. (2012). Modelling and economic optimisation of under-floor heating system. *Building Services Engineering Research and Technology*, pp. 191-202.
- Surperformance SAS. (s.d.). *NASDAQ 100 : Composition indice NASDAQ 100*. Consulté le Juillet 30, 2019, sur ZoneBourse.com: <https://www.zonebourse.com/NASDAQ-100-4946/composition/>
- Svendsen, S. (2012, Février). Improving the Dimensioning of Piping Networks and Network Layouts in Low-Energy District Heating Systems Connected to Low-Energy Buildings: A Case Study in Roskilde, Denmark. *Energy*, pp. 276-290.
- TiSoft. (s.d.). *HeatingDesign*. Consulté le Juillet 30, 2019, sur Ti-Soft.com: <https://www.ti-soft.com/en/support/help/heating>
- Uponor Corporation. (s.d.). *Uponor MagiCAD Plugin*. Consulté le Juillet 30, 2019, sur MagiCAD.com: https://www.magicad.com/en/mc_plugins/uponor-magicad-plugin/
- Wang, H., Jang, P., & Stori, J. A. (2005, Février). A Metric-Based Approach to Two-Dimensional (2D) Tool-Path Optimization for High-Speed Machining. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, pp. 33-48.



Willms GmbH. (s.d.). *HT2000*. Consulté le Juillet 30, 2019, sur HT2000.com:
<https://www.ht2000.com/en/products/ht2000>

Zhou, B., Zhao, J., Li, L., & Xia, R. (2016). A smooth double spiral tool path generation and linking method for high-speed machining of multiply-connected pockets. *Precision Engineering*, pp. 48-64.

8 Annexe I – Lexique

8.1 Définitions

Certains termes liés à la problématique n'étant pas d'un usage courant, nous avons souhaité les définir ici afin de faciliter la lecture.

Terme	Définition
Collecteur	Dispositif projetant de l'eau chauffée et récupérant de l'eau tempérée auquel les tuyaux sont raccordés afin de former des boucles.
Boucle	Tuyau servant à chauffer une zone donnée, placé au niveau du sol et dont les deux extrémités sont reliées à un collecteur, l'une recevant l'eau chauffée, l'autre retournant l'eau tempérée.
Chauffage au sol	Dispositif installé au sol, généralement sous un revêtement (bois, carrelage, enduit...) et dont la fonction est de produire de la chaleur afin d'assurer le confort dans une pièce.
Plan de calepinage	Illustration graphique permettant de déterminer la forme, les dimensions et l'emplacement d'éléments à installer. Dans le cas des chauffages au sol hydrauliques, le plan de calepinage montre le chemin suivi par les tuyaux.
Entraxe (ou entr'axe)	Distance entre les axes centraux de deux choses ; distance de centre à centre.
Zone à chauffer	Zone devant être chauffée par le système de chauffage au sol.
Zone de distribution	Zone souvent centrale et contenant un collecteur par laquelle les boucles passent pour parvenir aux zones à chauffer.
Contre-flux	Flux parallèle à un autre et circulant dans le sens opposé.

8.2 Termes français et anglais

Le tableau ci-dessous donne la correspondance français-anglais de certains termes spécifiques relatifs au bâtiment et aux chauffages par le sol.

Terme français	Terme anglais
Collecteur	Manifold
Chauffage au sol	Underfloor heating (ne pas confondre avec <i>ground heating</i> qui signifie pompe à chaleur)
Serpentin	Serpentine ou meander
Spirale (ou escargot)	Counter-flow spiral (ou snail)
Counterflow	Contre-flux

Je déclare, par ce document, que j'ai effectué le travail de Bachelor ci-annexé seul, sans autre aide que celles dûment signalées dans les références, et que je n'ai utilisé que les sources expressément mentionnées. Je ne donnerai aucune copie de ce rapport à un tiers sans l'autorisation conjointe du RF et du professeur chargé du suivi du travail de Bachelor, y compris au partenaire de recherche appliquée avec lequel j'ai collaboré, à l'exception des personnes qui m'ont fourni les principales informations nécessaires à la rédaction de ce travail et que je cite ci-après :

