

# Guide au „Use Case“ géoréférencement (GeoRef)

22.01.2021

## A propos de ce document

Ce guide vise à montrer aux **architectes/planificateurs et aux ingénieurs** la nécessité de géoréférencer leur modèle numérique de bâtiment et à expliquer les principes fondamentaux essentiels pour y parvenir. Aux géomaticiens il montrera comment leurs données sont intégrées dans le BIM et quelles sont les données qu'un coordinateur BIM attend d'eux. Les explications sont formulées de manière générale et prennent en compte les caractéristiques locales de la Suisse.

Ainsi, les bases théoriques permettant de comprendre les différents systèmes de coordonnées sont présentées dans le premier chapitre. Seuls les éléments vraiment nécessaires sont traités. Le lecteur intéressé pourra se référer à la littérature présentée ci-dessous. Le chapitre 2 donne des recommandations pratiques quant au choix des différents systèmes de coordonnées et fait le lien avec les attributs IFC. Dans ce cadre, les auteurs ont fait part de leurs expériences au sens des « best practices ».

Un schéma a été développé pour décrire graphiquement le processus de géoréférencement. Il montre pas à pas les étapes d'un géoréférencement correct à appliquer au début du processus. Ce schéma ainsi que cette documentation sont disponibles sur la plateforme d'échange du « use case management » de buildingSMART (<https://ucm.buildingsmart.org/>). Ils sont prévus pour servir de base à d'autres « use cases » comme par exemple « implantation à partir du modèle » («Absteckung aus Modell») ou « coordination spécialisée » («Fachkoordination»). Ce document remplace le document servant de « use case » jusqu'à maintenant : « Géoréférencement (origine du projet) » («Georeferenzierung (Projektursprung)»).

Les documents suivants sont été utilisés comme source de documentation :

- buildingSMART FR, 2020. *Géoréférencer un projet BIM*.
- Clemen, C., Görne, H., 2019. *Level of Georeferencing (LoGeoRef) using IFC for BIM*. Journal of Geodesy, Cartography and Cadastre, 10/2019, S. 15-20. ISSN: 1454-1408.
- Ingensand, H., 2004. *Einführung in die Geodätische Messtechnik für Geomatik- und Bauingenieure*. ETH Zürich.
- Kaden, R., Clemen, C., 2017. *Applying Geodetic Coordinate Reference Systems within Building Information Modeling (BIM)*. FIG Working Week 2017. Helsinki Finland.
- Kaden, R., et al., 2019. *Leitfaden Geodäsie und BIM. Version 2.0 (2019)* DVM-Merkblatt 11-2019.
- Jaud, S., Donaubauer, A., Borrmann, A.: Georeferencing with IFC: A Novel Approach for Infrastructure Objects, in: Computing in Civil Engineering, ASCE 2019, pp. 377-385.
- Mitchell, J., et al., 2020. *User Guide for Geo-referencing in IFC. "How to Setup Geo-referencing in a Building or Linear Infrastructure Model"*. Version 2.0. buildingSMART Australia.
- SIA D0270, 2018. *Anwendung der BIM-Methodik. Leitfaden zur Verbesserung der Zusammenarbeit*.

## Auteurs

|   |   |   |
|---|---|---|
|  |  |  |
| Andreas Barmettler (Projektleiter)<br><a href="#">Trigonet AG, Luzern</a>         | David Holdener<br><a href="#">bbp geomatik ag, Gümligen</a>                       | Thomas Marti<br><a href="#">Jauslin Stebler AG, Muttenz</a>                         |

Rédaction: Bernd Domer ([HES-SO/HEPIA](#)), Andreas Kluser ([GeoplanTeam](#))

Nous remercions le [groupe de pilotage BIM-Geodaten](#) pour le démarrage des travaux et [Ingénieurs-Geomètres Suisses](#) (IGS) pour le soutien financier pour la création de ces documents.

## 1. Introduction

Les aspects les plus importants du chapitre sont résumés ci-après:

Le sujet du géoréférencement doit être traité et documenté par le planificateur resp. l'architecte tout au début du projet. Cela permet d'éviter des erreurs et des surcoûts à tous les intervenants. Le géoréférencement crée la relation entre le système de coordonnées du projet et le système de coordonnées géodésique d'ordre supérieur, au moyen d'une transformation. Comme les systèmes de coordonnées géodésiques engendrent des déformations, il peut en résulter des imprécisions lors des transformations. Ces dernières doivent être examinées en regard des exigences de précision du projet et, cas échéant, des mesures, comme par exemple l'introduction d'un facteur d'échelle, doivent être prises lors des transformations.

Dans le concept BIM, les données géométriques resp. les coordonnées, exprimées parfois dans différents systèmes de coordonnées, doivent être échangées. Ainsi des géodonnées comme les limites de biens-fonds, des altitudes ou des plans directeurs se réfèrent à un système de coordonnées (national) « déformé ». Les données d'un projet BIM, par contre, se réfèrent souvent à un système de coordonnées cartésien sans déformation. Si ce système de coordonnées est mis en relation avec le système de coordonnées géodésique supérieur par une transformation, on parle de géoréférencement. Lors d'une telle transformation, lorsque, par exemple, on intègre des géodonnées comme base de planification BIM ou, à l'inverse, lorsqu'on exporte des données du projet BIM vers la réalité du terrain (implantation / pose d'axe), des écarts ou imprécisions peuvent apparaître. L'importance des écarts / imprécisions dépend de différents facteurs :

- du système de coordonnées du projet choisi
- de la longueur et de la hauteur du projet
- de la position et de l'altitude (m.ü.M.) du projet dans la réalité.

En fonction des exigences de précision et des cas d'application, il faut juger si les imprécisions résultantes sont tolérables ou pas. Pour cette raison, dès le début du projet, outre le choix du système de coordonnées du projet, des réflexions doivent être menées sur la transformation dans le système de coordonnées d'ordre supérieur c'est à dire le géoréférencement.

Les systèmes de coordonnées courants sont:

- **le système local de coordonnées:** système de coordonnées cartésien, sans déformation, avec un horizon de référence plat, une échelle de 1:1 ou sans distorsion d'échelle, avec de « petites » coordonnées, orienté orthogonalement selon la géométrie du projet (tourné par rapport au nord) et, la plupart du temps, avec une altitude nulle (+/- 0.00) comme référence altimétrique. Les longueurs, dans un tel système de coordonnées, correspondent aux longueurs réelles à l'endroit du projet (pas de déformation des longueurs). C'est dans un tel système que fonctionnent généralement les systèmes de BIM de création.
- **Le système de coordonnées géodésique:** système de coordonnées, de projection, avec des déformations, un horizon de référence courbe, une échelle différente de 1 et de « grandes » coordonnées, orienté nord et avec une altitude usuelle comme référence altimétrique (m.ü.M.). Les longueurs mesurées ou calculées à partir de telles coordonnées ne correspondent en général pas aux longueurs mesurées à l'emplacement du projet in situ (déformation des longueurs).

La déformation des longueurs ou réduction dans le système de coordonnées géodésique comprend, globalement, la réduction due à la projection et la réduction due à l'altitude :

- **La réduction due à projection:** lors de la projection de l'ellipsoïde, modèle approximatif de la terre, sur un plan, une déformation des longueurs se produit. Elle dépend de l'éloignement nord/sud du point de contact du cylindre. Dans le cas de la Suisse, ce point se situe à Berne (Fig. 1). La correction des longueurs à apporter en passant du système de coordonnées géodésiques à un système local ou à la réalité du terrain est ainsi négative. Cela signifie qu'une distance de 100 m déduites de coordonnées nationales à Bâle Ville Bei (distante à 65 km de Berne) aura dans la réalité, en raison de la réduction due à la projection, une longueur de 99.995 m, à Lugano (à 100 km sud de Berne) 99.988 m et à Berne 100.00 m.

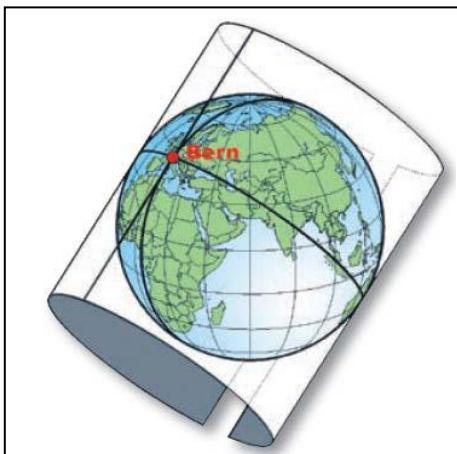


Fig. 1: projection de la terre sur un cylindre à axe oblique  
(source swisstopo)

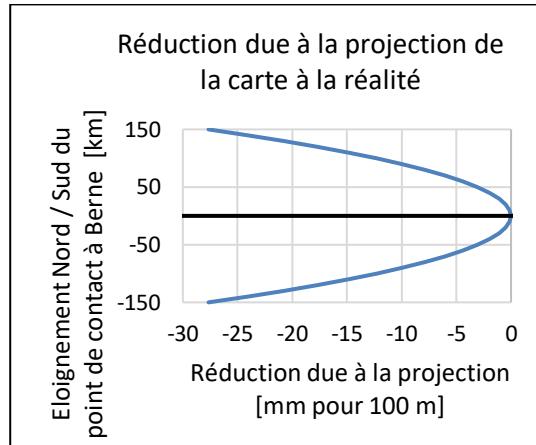
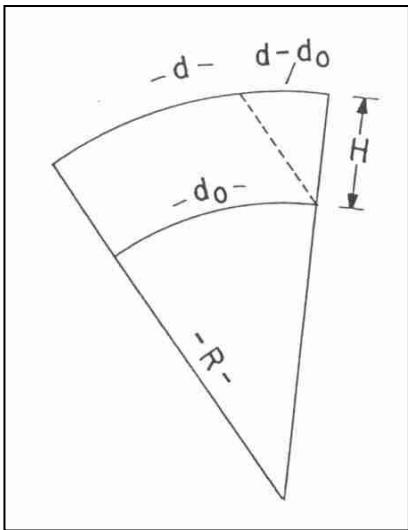
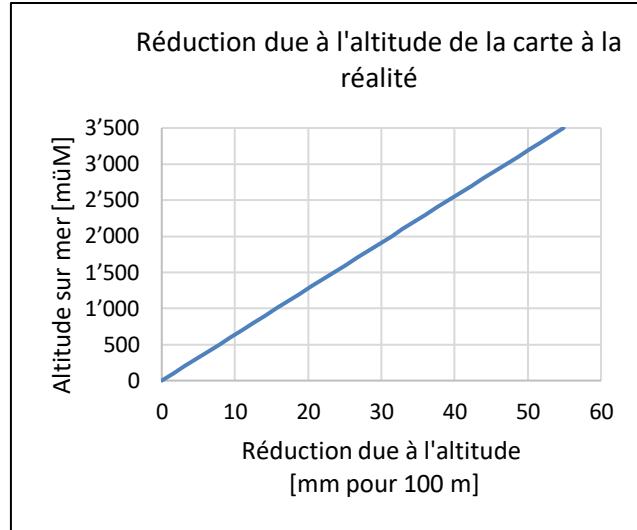


Fig. 2: réduction due à la projection

- **La réduction due à l'altitude:** les géodonnées entachées d'une échelle, ou des distances déduites de coordonnées, se situent à l'altitude zéro de l'horizon de référence (p.e. MN95 = 0.00 m.ü.M.). La déformation des longueurs change donc en fonction de l'altitude à laquelle se situe le projet. La correction des longueurs du système de coordonnées géodésiques à un système local ou à la réalité du terrain est ainsi positive. Cela signifie qu'une distance de 100 m déduite de coordonnées nationales à Bâle Ville (à l'altitude de 245 m.ü.M) aura dans la réalité, en raison de la réduction due à l'altitude, une longueur de 100.004 m, à Zermatt (à l'altitude de 1'600 m.ü.M) 100.035 m et au Titlis (à l'altitude de 3'240 m.ü.M) 100.051 m.

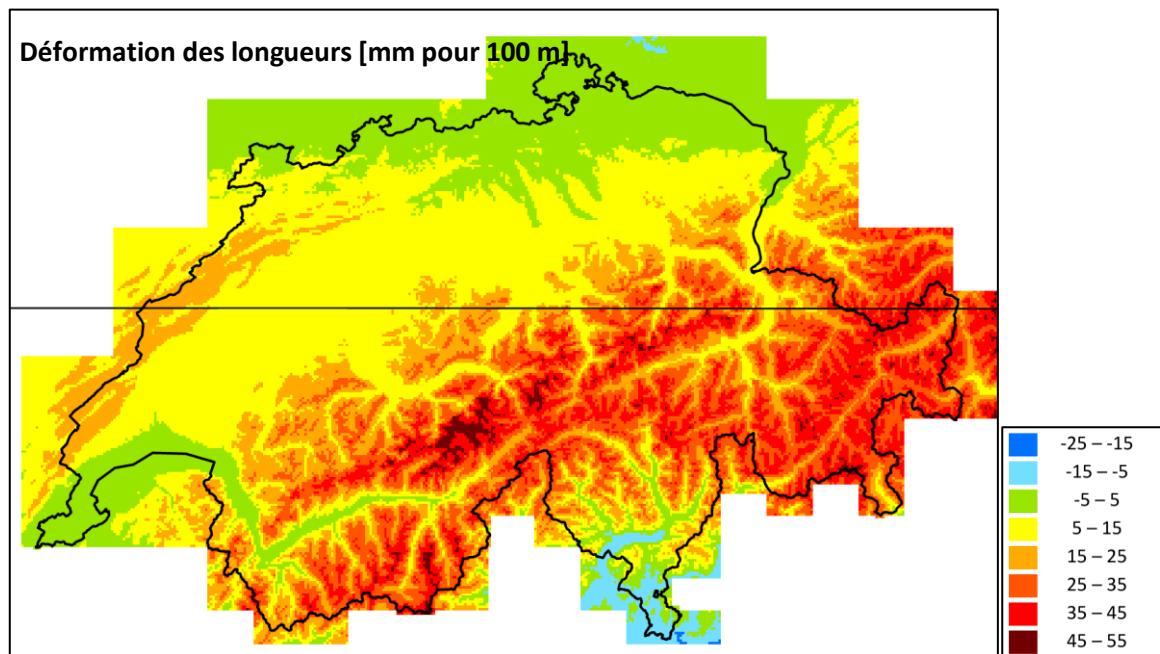


*Fig. 3: Principe de la réduction due à l'altitude  
(Ingensand (2004))*



*Fig. 4: Réduction due à l'altitude*

L'importance de la déformation et donc de l'échelle dépend de l'emplacement du projet. Dans la figure suivante, les deux composantes de la déformation des longueurs, à savoir la réduction due à la projection et la réduction due à l'altitude sont prises en compte. En raison de leur signe opposé, elles se compensent partiellement. Ainsi, il n'y a pas de déformation supérieure à 15 mm pour 100 m sur le plateau suisse.



*Fig. 5: Déformation des longueurs en Suisse en mm, tenant compte de la réduction due à la projection et celle due à l'altitude*

Dans un projet BIM, on préfère travailler avec des longueurs réelles aussi bien pour les mesures que pour les analyses, comme par exemple la détermination de quantité basée sur un modèle, et travailler avec un système de coordonnées orienté selon le bâtiment. En outre, la plupart des utilisateurs BIM s'accommodent mieux de « petites » coordonnées. Pour ces différentes raisons, un système de coordonnées local, et non un système de coordonnées géodésique, est très souvent choisi comme système de coordonnées du projet.

Tout système de coordonnées local possède un point origine (point zéro en planimétrie) dans le logiciel de création ( $x=0.00$ ,  $y=0.00$ ) appelé **point de référence du projet (PRefP)** ainsi qu'un point de

référence altimétrique local ( $z=0.00$ ) appelé **point de référence d'altitude (PRefK)** selon la norme SIA D0270 (2018). Le PRefP est donc le point zéro du périmètre global du projet et non pas le point zéro d'un bâtiment comme par exemple le **point de référence du bâtiment (GRefP)** d'un bâtiment particulier dans le périmètre du projet (voir également la norme SIA D0270 (2018), chap. 7.8). La définition et la documentation correctes du PRefP et du PRefK sont importantes et doivent être soigneusement étudiées car toute la géométrie du projet se rapporte à ces deux références. Lors d'une transformation ou d'un géoréférencement, ces éléments ont également une influence sur la précision ou sur des différences résultantes.

Lorsqu'on utilise des géodonnées comme base de planification ou pour des travaux de mensuration, le système local de coordonnées du projet doit être défini, en planimétrie et en altimétrie, par rapport au système de coordonnées géodésique supérieur. Ainsi seront déterminés des paramètres de transformation qui permettront de passer de la géométrie du système local au système de coordonnées supérieur ou, réciproquement, d'importer des bases de planification dans le système de coordonnées local (Fig. 6).

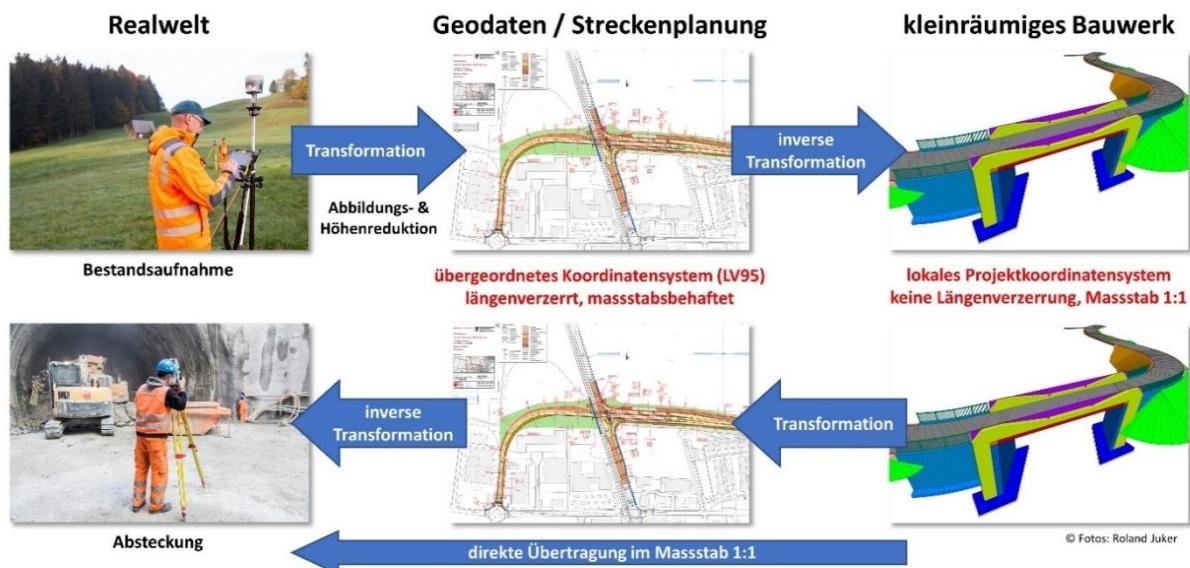


Fig. 6: systèmes de coordonnées et transformations lors du travail en BIM pour des travaux d'infrastructure  
(tiré de Anlehnung an Kaden et al. (2019))

Le système de coordonnées du projet, la détermination des paramètres de transformation ainsi que le calcul des écarts maximaux qui en résultent, en tenant compte de l'emplacement du projet et de sa taille, doivent obligatoirement être définis et documentés au début d'un projet. Il est très important de bien choisir le système de coordonnées du projet. Dans la plupart des projets de construction, les géodonnées sont indispensables comme éléments de base mais aussi pour tous les travaux de mensuration tels les relevés ou les implantations. Pour éviter des erreurs et du travail supplémentaire à tous les intervenants, ces définitions sont essentielles. Dans les chapitres suivants sera décrite la manière de mettre en œuvre de manière efficace ces définitions dans un projet BIM. Quelques recommandations pratiques seront données sur différents points.

## 2. Recommandations et «best practice»

Selon la norme SIA D0270 (2018), le mandant (le maître de l'ouvrage) spécifie, dans le cadre d'un projet BIM, ses objectifs et ses besoins de renseignements sous la forme du *Besoins d'information du mandant* (IAG ou *Exigences d'informations du mandant* AIA). Y figurent, outre la description du projet de construction, l'organisation du projet, ses buts et ses processus ainsi que les conditions cadres. Les IAG contiennent également des informations sur l'emplacement du projet et sa taille. En rapport avec la problématique du géoréférencement, le mandant doit exiger, dans le IAG, de la part du mandataire (souvent l'architecte) les informations suivantes :

1. Définition et documentation du système de coordonnées du projet
2. Définition et documentation des PRefP et PRefK
3. Définition et documentation d'une éventuelle déviation du nord de la carte, d'une rotation
4. Définition et documentation d'une éventuelle modification d'échelle
5. Définition et documentation de deux points de référence supplémentaires à des fins de contrôle.

Le mandataire devrait également décrire comment les prescriptions ont été prises en compte. Ainsi le concepteur sera tenu de documenter les éléments nécessaires au géoréférencement dans le Plan de Déroulement du Projet (BAP), au plus tard au début de la phase SIA 32 (avant projet). Cela doit être fait avant la création du premier modèle de référence.

Les informations importantes pour le géoréférencement doivent non seulement être contenues dans le BAP mais aussi dans les données de l'Industry Foundation Classes (IFC) correspondant. Des recommandations seront données ci-après sur ces différents points.

### 2.1 Recommandation pour la définition du système de coordonnées du projet

Les aspects les plus importants du chapitre sont résumés ci-après:

Pour des bâtiments ou des petits ouvrages, un système de coordonnées local, sans déformation, qui se réfère au système de coordonnées géodésiques d'ordre supérieur, est généralement suffisant comme système de coordonnées du projet (PRefP = Point limite ou point fixe planimétrique).

Dans le cas d'ouvrages importants ou linéaires de grande dimension, le tracé est généralement décrit dans un système de coordonnées géodésiques alors que les petites structures d'ingénieurs qui lui sont liées sont décrites dans un système de coordonnées local qui leur est propre mais en lien avec le tracé. Les paramètres de transformation nécessaires au géoréférencement sont calculés sur la base de points de contrôle identiques dans les deux systèmes et les écarts ou imprécisions sont analysés. En fonction des exigences de précision du projet, une échelle devra peut-être être introduite.

Le système de coordonnées du projet est souvent négligé par le mandant ou l'architecte. Soit il n'y a pas de relation correcte avec le système de coordonnées d'ordre supérieur (géoréférencement manquant) soit cette relation est documentée de manière lacunaire et mal communiquée aux autres intervenants du projet. Cela conduit alors forcément à des dysfonctionnements dans la coordination, des coûts supplémentaires et des erreurs. Une définition et une documentation précoce du système de coordonnées, valable pour tous, est donc primordial. La taille du projet est un critère essentiel pour choisir un système de coordonnées local, sans déformation, ou un système géodésique affecté de déformation.

Pour **des bâtiments en hauteur ou pour des ouvrages de petite taille**, un système de coordonnées local, sans déformation qui se réfère au système de coordonnées géodésiques d'ordre supérieur, est généralement suffisant comme système de coordonnées du projet (PRefP = Point limite ou point fixe planimétrique).

**Pour des ouvrages volumineux ou de forme linéaire**, de grande dimension comme des réseaux routiers ou ferroviaires, le tracé est en général défini dans un système de coordonnées géodésique. Les petits ouvrages qui lui sont liés ou des portions du projet, comme les ponts, les murs de soutènement, les gares et les petits tunnels, par contre, se réfèrent à un système local. Un système de coordonnées local est défini pour chacune de ces structures ou portions de projet mais est relié au système de coordonnées géodésique supérieur, lequel décrit l'ensemble du tracé (Fig. 6).

Pour la transformation correspondante, en planimétrie et en altimétrie, les paramètres suivants doivent être déterminés:

- déplacement horizontal ou translation ( $\Delta x, \Delta y$ )
- rotation par rapport au nord de la carte (Rot.)
- échelle (e)
- déplacement ou décalage vertical ( $\Delta z$ )

Pour la détermination des paramètres de transformation planimétrique, au moins deux points de calage sont nécessaires, points pour lesquels les coordonnées sont connues dans le système local du projet et dans le système géodésique d'ordre supérieur. Comme points de calage, les points fixes ou les points limites de la mensuration officielle conviennent particulièrement bien. Pour le calcul du déplacement vertical, un seul point de calage altimétrique suffit, point pour lequel l'altitude est connue dans les deux systèmes. Pour des questions de surdétermination, surtout lors de la détermination des points sur le terrain, il est recommandé d'avoir à disposition plus de points que le minimum nécessaire pour les calculs. Il faut également tenir compte du fait que des tensions ou des déformations peuvent également exister au niveau du terrain. Pour pouvoir les détecter (et pouvoir, par exemple, les ignorer), il est nécessaire d'avoir une certaine surdétermination ou surabondance.

Fondamentalement, pour une utilisation simple et pratique, on aspire à une échelle de 1 : 1, c'est-à-dire sans changement d'échelle. Ainsi la géométrie n'est que déplacée et tournée. Cependant, en fonction de la position du projet en Suisse, des différences d'échelles significatives, dépendantes de la projection, de la réduction due à l'altitude et de la taille du projet peuvent apparaître.(Fig. 5).

Ainsi, en rapport avec le géoréférencement d'un projet, il faut répondre aux deux questions suivantes :

- 1) est-ce qu'un changement d'échelle, en rapport avec les déformations locales liées au lieu, doit être nécessairement pris en compte dans la transformation ?
- 2) est-ce que la taille du projet, en planimétrie et en altimétrique, est telle que les différences dans la déformation des longueurs dans la réalité conduisent à des imprécisions/écarts qui ne peuvent être tolérés ?

S'il est possible de répondre par « non » aux deux questions, il n'est pas nécessaire d'introduire une échelle dans la transformation, mais seulement un déplacement horizontal, une éventuelle rotation par rapport au nord ainsi qu'un éventuel décalage vertical. Si les déformations liées à l'emplacement du projet, selon la question 1, sont significatives, il faut alors introduire une échelle dans la transformation. Il est recommandé de calculer et d'introduire une échelle moyenne en rapport avec l'entier du périmètre du projet.

La deuxième question n'est, dans la plupart de cas, pertinente que pour des projets de grande ampleur, de forme linéaire, comme les routes ou les lignes de chemin de fer, de plus de 1 kilomètre. S'il y est répondu par un « oui », l'ouvrage doit alors être découpé en différentes parties auxquelles peuvent être appliquées des échelles différentes ou pas d'échelle. Dans ces cas, il faut être particulièrement attentif aux effets de bords. En effet, les différences par rapport au système supérieur apparaissent surtout dans les bords, aux extrémités. Elles peuvent être traitées de manière spécifique en fonction des exigences de précision, par exemple au moyen d'une courbe de transition par des mesures de points de calage.

S'il n'y a pas division en sections partielles possible / sensée, il n'y a pas d'alternative à l'utilisation du système géodésique comme système de coordonnées du projet. A cet effet, on utilise généralement le système de référence suisse appelé CH1903+/LN02 avec son cadre de référence associé MN95. Pour minimiser les effets des réductions dues à la projection et à l'altitude voire tenter de s'en

affranchir, il est possible de définir, dans des cas particuliers, un système de coordonnées spécifique basé sur MN03+. Dans ce cas, on place un grand cercle au centre du projet avec un niveau de référence moyen.

## 2.2 Recommandation pour la définition du point de référence du projet (PRefP)

Les aspects les plus importants du chapitre sont résumés ci-après:

Le PRefP est le point zéro, en planimétrie, du système de cordonnées du projet et doit être volontairement positionné sur un point connu dans le système de coordonnées géodésique (point limite, point fixe planimétrique). Il est représenté sous la forme d'une pyramide avec une base carrée avec des informations sémantiques. Le PRefP est décrit dans le BAP.

Selon la norme SIA D0270 (2018), le point de référence du projet (PRefP) est le point zéro du projet dans le système de création et a donc, par définition, les coordonnées planimétriques ( $x=0, y=0$ ) dans le système de coordonnées local du projet. En principe, le PRefP peut être choisi de manière arbitraire. Cependant, concernant sa détermination, il est recommandé de suivre les points suivants :

- placement „en bas à gauche“ de telle sorte que toute la géométrie de l'ouvrage se trouve dans le premier cadran et qu'ainsi toutes les coordonnées soient positives
- placement sur un point limite ou un point fixe planimétrique de la mensuration officielle pour s'assurer d'un géoréférencement simple
- le PRefP est représenté géométriquement dans le modèle de référence comme la pointe d'une pyramide à base carrée d'un mètre. Dans l'IFC2x3, le PRefP est décrit comme *IfcBuildingElementProxy* et dans IFC4 comme une surface en mosaïque (TESSELATION) de type *IfcGeographicElement* avec la définition «PRefP» (Fig. 7)
- les attributs nécessaires du PRefP, comme par exemple le nom « PRefP », les coordonnées dans le système local et dans le système d'ordre supérieur, peuvent être décrits dans un PropertySet «PSet\_GeoRef» (Abb. 8)
- ces données doivent être conservées dans le BAP.

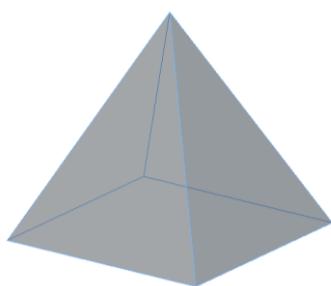


Fig. 7: représentation géométrique du PRefP par une pyramide

| PSet_GeoRef      |             |
|------------------|-------------|
| Name             | PRefP       |
| LocalX           | 0.000       |
| LocalY           | 0.000       |
| LocalZ           | 0.000       |
| Easting          | 2610914.177 |
| Northing         | 1267868.586 |
| OrthogonalHeight | 262.460     |

Fig. 8: données sémantiques du PRefP dans un PropertySet

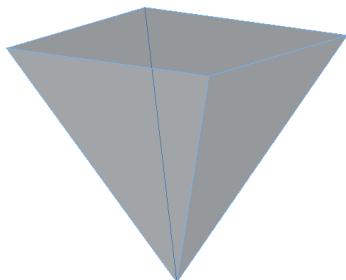
## 2.3 Recommandation pour la définition du point de référence altimétrique du projet (PRefK)

Les aspects les plus importants du chapitre sont résumés ci-après:

Le PRefK est l'altitude locale du projet (+/-0.00) et doit être décrit par une pyramide à l'envers, pour une meilleure différentiation visuelle d'avec le PRefP, et avec des données sémantiques. Le PRefK est décrit dans le BAP.

L'altitude du projet est définie, de manière indépendante, à l'aide du point de référence altimétrique (PRefK) et donne l'altitude locale du projet (généralement l'altitude +/-0.00) ainsi que l'altitude usuelle correspondante, soit l'altitude sur mer. Ce point est également décrit géométriquement, comme le PRefP, à l'aide d'une pyramide à base carrée. Cependant pour se distinguer visuellement

du PRefP, la pyramide du PRefK est tournée à l'envers, sommet en bas (Fig. 9). On peut attribuer «PRefK» comme nom (Fig. 10). Idéalement la pyramide est positionnée à l'emplacement du zéro comme par exemple sur le seuil de la porte d'entrée ou sur le sol fini de la cuisine au rez-de-chaussée. Cela n'est cependant pas possible dans les premières phases du projet. Dans ce cas, il peut être défini à un endroit judicieux dans le périmètre du projet. Il est important que l'emplacement exact du point de référence altimétrique soit décrit de manière claire dans le BAP.



*Fig. 9: représentation géométrique du PRefK à l'aide d'une pyramide sur la tête*

| PSet_GeoRef      |             |
|------------------|-------------|
| Name             | PRefK       |
| LocalX           | 48.485      |
| LocalY           | 21.482      |
| LocalZ           | 0.000       |
| Easting          | 2610962.662 |
| Northing         | 1267890.068 |
| OrthogonalHeight | 260.460     |

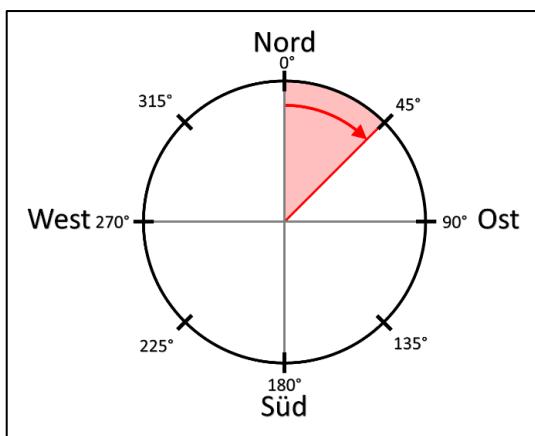
*Fig. 10: données sémantiques du PRefK dans un PropertySet*

## 2.4 Recommandation pour la définition d'une éventuelle rotation (déviation du nord)

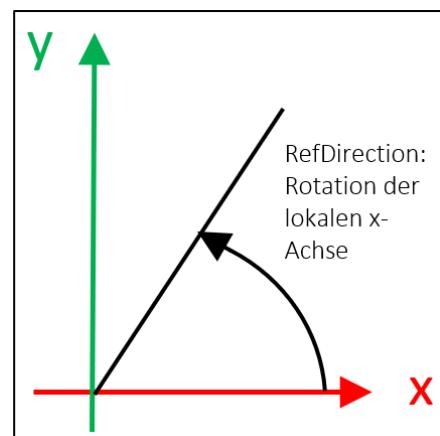
Les aspects les plus importants du chapitre sont résumés ci-après:

Si le modèle est tourné par rapport au nord de la carte, l'angle de rotation doit être décrit, avec trois décimales, comme un azimuth, c'est-à-dire comme une valeur d'angle par rapport à l'ordonnée dans le sens des aiguilles d'une montre et doit être décrit dans le BAP.

Contrairement à la recommandation de la norme SIA D0270 (2018), pour un travail efficace dans le logiciel de création, le système d'axes est orienté perpendiculairement au bâtiment ou parallèlement à un système d'axes local provenant du terrain. Si le modèle est tourné par rapport au nord de la carte, il est important de travailler avec une valeur d'angle définie en degrés et non pas par rapport à l'orientation d'un objet une limite ou un axe. L'angle de rotation doit être décrit dans le BAP avec la translation et le décalage altimétrique et avec au minimum 3 décimales. La rotation ou déviation par rapport au nord doit absolument être définie comme un azimuth, c'est-à-dire une valeur angulaire par rapport à l'ordonnée, comptée dans le sens des aiguilles d'une montre (Fig. 11). A noter que la définition de la rotation peut varier en fonction du logiciel de création. Il est donc indispensable de vérifier comment est défini l'angle dans l'application utilisée. Dans ArchiCAD, par exemple, la rotation est mesurée dans le sens anti-horaire par rapport à l'abscisse (Fig. 12). La rotation utilisée peut être contrôlée à l'aide du PRefP et des autres points de calage.



*Fig. 11: définition du sens de rotation géodésique resp. de l'azimut (sens des aiguilles d'une montre)*



*Fig. 12: définition de la déviation du nord de la carte au moyen d'une variable de géoréférencement IfcLocalPlacement*

Généralement, en IFC, les rotations, selon ISO 10303-42, ne sont pas définies par une valeur angulaire mais par un vecteur. L'angle est alors calculé à partir du rapport des composantes x et y de ce vecteur. En IFC, on utilise l'ensemble des entités (classe) *IfcDirection*.

Comme décrit au chap. 2.7, il existe différentes manières de transférer une éventuelle déviation par rapport au nord de la carte. Pour la variante de géoréférencement utilisant *IfcLocalPlacement*, la valeur de la déviation est stockée dans l'attribut *RefDirection* de l'objet *IfcAxis2Placement3D*. Dans ce cas, *RefDirection* donne l'angle de l'axe x local, de l'abscisse, dans le sens de rotation mathématique, soit dans le sens contraire des aiguilles d'une montre et pas comme un azimut (Fig. 12)

## 2.5 Recommandation pour la définition d'un éventuel facteur d'échelle

Les aspects les plus importants du chapitre sont résumés ci-après:

Un facteur d'échelle doit être donné avec au moins 5 décimales et doit être documenté dans le BAP.

Lors d'un changement d'échelle, toute la géométrie du bâtiment est modifiée en dimension. Dans la méthode BIM, on essaie dans la mesure du possible de travailler sans facteur d'échelle, autrement dit avec un facteur d'échelle égal à 1. Cela signifie que le modèle et toutes ses dimensions correspondent à la réalité. Si la transformation vers le système de coordonnées d'ordre supérieur nécessite un facteur d'échelle défini, différent de 1, notamment pour des questions de précision, il faut le documenter dans le BAP. Dans la plupart des cas, on peut renoncer à introduire un facteur d'échelle et il est donc recommandé, pour le géoréférencement, d'utiliser une transformation sans facteur d'échelle.

Un facteur d'échelle, dans le format IFC, est donné par la variable de géoréférencement *LoGeoRef50*. Cela n'est cependant possible qu'à partir de la version 4. Plus de détail sont donnés au chapitre. 2.7. Il est important de garder à l'esprit que la problématique du facteur d'échelle est traitée de manière distincte en planimétrie et en altimétrie. Un facteur d'échelle, induisant des déformations de longueurs, n'affecte que la planimétrie (x, y) et n'a donc aucun effet sur les hauteurs. Les valeurs du facteur d'échelle doivent être données avec au moins 5 décimales (p.e. 0.99987). Au sens d'un contrôle qualité, il est expressément recommandé de procéder à un contrôle, après usage d'une transformation, à l'aide des points de calage.

## 2.6 Recommandation pour la définition de deux points de calage.

Les aspects les plus importants du chapitre sont résumés ci-après:

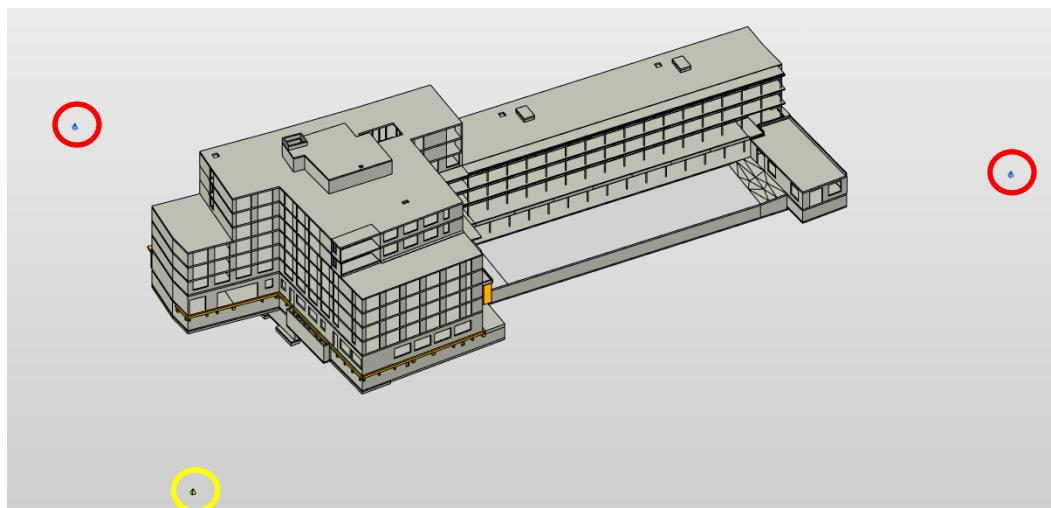
Les points de calage permettent de contrôler le géoréférencement de manière indépendante et simple. Ils possèdent, comme données sémantiques, les valeurs des coordonnées locales et celles du système de coordonnées d'ordre supérieur. Comme le PRefP, ils sont géométriquement représentés par un objet 3D de la forme d'une pyramide et sont décrits dans le BAP.

En procédant à une transformation, on établit la relation entre le projet et le système de coordonnées d'ordre supérieur et on effectue ainsi le géoréférencement. Pour éviter des fautes, on utilise la possibilité d'effectuer un contrôle simple et indépendant, car de petites différences dans les décimales peuvent conduire à des écarts non négligeables sur de grandes longueurs. Une solution consiste à introduire deux points de calage supplémentaires.

Comme mentionné précédemment, les points de calage possèdent des coordonnées dans le système local et dans le système de coordonnées d'ordre supérieur. Elles sont utilisées pour calculer les paramètres de transformation planimétrique. Les points de calage devraient remplir, de manière optimale, les conditions suivantes :

- point avec des coordonnées connues dans le système géodésique, de préférence issu de la mensuration officielle (point limite ou point fixe planimétrique)
- emplacement à l'extérieur ou en bordure du périmètre du projet pour un calcul et un contrôle optimaux (Fig. 13)
- une matérialisation physique ou des mesures de conservation du point dans la réalité ne sont pas nécessaire.

Comme pour le PRefP, les points de calage sont représentés par des objets 3D de la forme d'une pyramide (Fig. 7) avec la description «PP» suivie d'un numéro d'ordre croissant, p.e. «PP01», «PP02» etc et sont décrits dans le BAP (Fig. 14).



*Fig. 13: entouré de jaune = PRefP, entourés de rouge = deux points de calage*

| PSet_GeoRef      |             |
|------------------|-------------|
| Name             | PP01        |
| LocalX           | 15.269      |
| LocalY           | 51.248      |
| LocalZ           | 1.552       |
| Easting          | 2610929.446 |
| Northing         | 1267919.834 |
| OrthogonalHeight | 262.012     |

| PSet_GeoRef      |             |
|------------------|-------------|
| Name             | PP02        |
| LocalX           | 124.532     |
| LocalY           | 42.196      |
| LocalZ           | 2.697       |
| Easting          | 2611038.709 |
| Northing         | 1267910.782 |
| OrthogonalHeight | 263.157     |

*Fig. 14: deux exemples de données sémantiques relatives aux points de calage comme PropertySet*

## 2.7 Recommandation relative aux possibilités de géoréférencement en IFC

Les aspects les plus importants du chapitre sont résumés ci-après:

En IFC, il existe plusieurs possibilités de géoréférencement. Clemen et al. (2019) avec l'introduction du concept *Level of Georeferencing (LoGeoRef)* proposent 5 niveaux. Pour un géoréférencement correct, les niveaux *LoGeoRef30*, *LoGeoRef40* et *LoGeoRef50* sont recommandés. Cependant, seul le niveau *LoGeoRef50* autorise un facteur d'échelle et l'introduction de métadonnées relatives aux systèmes de coordonnées. Ce niveau n'est disponible qu'à partir de la version 4 de l'IFC.

Un concept de description d'un réseau de points fixes, de points de calage et la possibilité d'effectuer une transformation en trois étapes pour des projets comprenant plusieurs bâtiments dans une zone commune de petite dimension manque dans le schéma de données de l'IFC.

Dans l'IFC de l'Open BIM Standard, les informations relatives au géoréférencement peuvent être enregistrées dans différents objets (classes et types) et caractéristiques (attributs, propriétés). Le géoréférencement nécessite la connaissance de métadonnées adéquates sur les systèmes de

coordonnées et les paramètres de transformations qui les concernent. En outre, le point zéro du projet, en planimétrie et en altimétrie (PRefP et PRefK), doit être clairement déterminé dans le logiciel de création. L'IFC propose plusieurs possibilités pour décrire le géoréférencement. Cela implique que les applications BIM, lors de l'IFC-Export ou de l'IFC-Import, transfèrent resp. interprètent différemment le géoréférencement. En principe, le schéma IFC permet même des données redondantes pour le géoréférencement. Cela peut conduire à des malentendus, que Clemen et al. (2019) ont tenté de lever avec l'introduction du concept de *Level of Georeferencing (LoGeoRef)*. Dans ce concept, les nombreuses possibilités de géoréférencement ont été décrites et classées en fonction de leur qualité de positionnement, comme *Level of Georeferencing (LoGeoRef)*, en cinq niveaux (*LoGeoRef10* à *LoGeoRef50*). La qualité du géoréférencement dans un fichier IFC augmente à chaque niveau. Cependant, chaque niveau existe pour lui-même et un niveau supérieur ne reprend pas automatiquement les informations du niveau inférieur. Pour que des niveaux intermédiaires puissent être insérés si nécessaire, les niveaux, dans leur désignation, ont été numérotés par pas de 10. A ce stade, on renoncera à une description approfondie de chaque niveau en renvoyant le lecteur à la littérature détaillée de Clemen et al. (2019). Le tableau suivant décrit les cinq niveaux et donne dans la dernière colonne une recommandation pour une application actuelle.

| Level of Georeferencing  | Version d'IFC | Objet IFC   | Paramètres de transformation               | Considérations   | recommandation |
|--|---------------|---|--|--|----------------|
| <b><i>LoGeoRef10:</i></b><br>adresse postale,<br>gestion de projet   | depuis IFC2x3 | <i>IfcPostalAddress</i> dans <i>IfcSite</i> et/ou. <i>IfcBuilding</i>   | (✓) Translation<br>✗ Rotation<br>✗ Echelle | <ul style="list-style-type: none"> <li>Adresse postale simple pour un géoréférencement simple</li> <li>Pas de position précise</li> <li>Lecture humaine possible, très partiellement par un ordinateur</li> <li>Pas de possibilité d'introduire une rotation et une échelle</li> </ul>   | Non recommandé |
| <b><i>LoGeoRef20:</i></b><br>coordonnées géographiques,<br>point sur une carte                                       | depuis IFC2x3 | <i>RefLatitude</i> ,<br><i>RefLongitude</i> ,<br><i>RefElevation</i> dans <i>IfcSite</i>  | ✓ Translation<br>✗ Rotation<br>✗ Echelle   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Simple „géoréférencement par point“ par l'attribut du chantier par le biais de coordonnées géographiques</li> <li>Position donnée par des angles en WGS 84 (seulement), séparés par une virgule</li> <li>Donnée relative à l'altimétrie (ReEle.) exprimée sous forme d'une valeur métrique sans possibilité de donner une date</li> <li>Pas de possibilités d'introduire une rotation et une échelle</li> </ul>                       | Non recommandé |
| <b><i>LoGeoRef30:</i></b><br>3+1-paramètres pour <i>IfcSite</i> Placement  | depuis IFC2x3 | <i>IfcLocalPlacement</i> dans <i>IfcSite</i> (ou anc. <i>IfcBuilding</i> ) avec <i>IfcCartesianpoint</i> et <i>IfcDirection</i> | ✓ Translation<br>✓ Rotation<br>✗ Echelle   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Géoréférencement de la structure qui se trouve au sommet de la hiérarchie spatiale (le plus souvent le chantier)</li> <li>Sans relation relative avec le système de référence d'ordre supérieur</li> <li>Transformation de Helmert 2D/3D sous la forme de coordonnées X-Y-Z</li> <li>Rotation donnée sous la forme de composantes d'un vecteur selon les axes X et Z</li> <li>Pas de possibilités d'introduire une échelle</li> </ul> | recommandé     |
| <b><i>LoGeoRef40:</i></b><br>3+1-paramètres au moyen de <i>GeometricRepresentationContext</i> pour <i>IfcProject</i> | depuis IFC2x3 | <i>IfcGeometricRepresentationContext</i> dans <i>IfcProject</i> avec <i>IfcCartesianpoint</i> et <i>IfcDirection</i>            | ✓ Translation<br>✓ Rotation<br>✗ Echelle   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Géoréférencement au niveau du projet</li> <li>Définition d'un système de coordonnées du projet (attribut: <i>WorldCoordinateSystem</i>) avec translation et en option une rotation semblable à celle du <i>LoGeoRef30</i></li> <li>Eventuelle redondance des données relatives à la déviation par rapport au nord de la carte</li> </ul>  | recommandé     |

|  |             |   |  |   |                                       |
|--|-------------|---|--|---|---------------------------------------|
|  |             |   |  | (attribut: <i>TrueNorth</i> ) = déviation de l'axe Y par rapport au nord de la carte<br>• Pas de possibilités d'introduire une échelle  |                                       |
| <b>LoGeoRef50:</b><br>3+1-Parameter und Metadaten zum übergeordneten Koordinatensystem | depuis IFC4 | <i>IfcMapConversion</i> mit <i>IfcGeometricRepresentationContext</i> und <i>IfcProjectedCRS</i> | ✓ Translation<br>✓ Rotation<br>✓ Echelle | <ul style="list-style-type: none"> <li>Introduction de la translation et de la rotation pour la transformation des coordonnées entre le système du projet et le système d'ordre supérieur</li> <li>Transformation de Helmert 2D/3D sous forme de Easting-, Northing-, OrthogonalHeight</li> <li>Rotation donnée sous forme de XAxisAbscissa-, XAxisOrdinate-</li> <li>Echelle possible</li> <li>Introduction de métadonnées et de description (p.e. EPSG-Code) des systèmes de coordonnées (PRS et CRS)</li> <li>Seulement à partir de IFC4, et non à partir de IFC2x3</li> </ul> | recommandé seulement à partir de IFC4 |

Tableau 1: Considérations sur les niveaux LoGeoRef selon Clemen et al. (2019) pour une application pratique

Les deux premiers niveaux **LoGeoRef10** et **LoGeoRef20** peuvent être utilisés pour une représentation cartographique simple « de type point » mais ne conviennent pas aux applications d'ingénierie ou de planification. **LoGeoRef30** décrit le géoréférencement de l'élément de structure le plus élevé dans la hiérarchie spatiale. Dans la plupart des cas, il s'agit du chantier (*IfcSite*). Dans l'attribut *RelativPlacement* du type *IfcAxis2Placement3D* de l'*IfcLocalPlacement* relié à l'élément de structure, on introduit la position du point zéro du projet dans le système de coordonnées supérieur sous forme de coordonnées X-, Y-, Z (*IfcCartesianPoint*) et l'éventuelle déviation par rapport au nord de la carte au moyen d'un vecteur avec des valeurs pour l'axe X et l'axe Z (*IfcDirection*).

Malheureusement, avec cette option de géoréférencement aucun facteur d'échelle et aucune métadonnée comme la description ou l'indication univoque, au moyen de l'EPSG-Code<sup>1</sup>, du système de coordonnées utilisé ne peuvent être introduits. Avec le **LoGeoRef40**, le géoréférencement n'est pas spécifié au niveau « élément » mais avec le *IfcGeometricRepresentationContext* au niveau « projet ». Il contient, dans l'attribut *WorldCoordinateSystem*, les coordonnées planimétriques et l'altitude du point zéro dans le système de coordonnées d'ordre supérieur, comme dans le **LoGeoRef30** avec le *IfcAxis2Placement3D*. Le nom de l'attribut *WorldCoordinateSystem* pourrait quelque peu porter à confusion car, dans les applications de création, ce terme désigne souvent le « système de coordonnées de calcul » et non un système de coordonnées géodésique d'ordre supérieur. Il est à noter qu'une éventuelle rotation pourrait être introduite de manière redondante, mais conforme au schéma, dans l'attribut *TrueNorth* ou dans le *IfcAxis2Placement3D* de l'attribut *WorldCoordinateSystem*.

Pour éviter des malentendus, il est recommandé d'introduire l'éventuelle rotation seulement dans l'attribut *TrueNorth* et non dans le *IfcAxis2Placement3D* de l'attribut *WorldCoordinateSystem*. L'introduction d'un éventuel facteur d'échelle et de métadonnées sur le système de coordonnées ne peut pas non plus être opérée avec dans le **LoGeoRef40**.

Ceci est possible avec le niveau **LoGeoRef50** mais seulement à partir de la version 4 de l'IFC. Les nouveaux objets *IfcMapConversion* et *IfcProjectedCRS* introduits avec l'IFC 4 permettent la transmission des paramètres de transformation entre le système de coordonnées du projet (PRS) et le système de coordonnées d'ordre supérieur (CRS) ainsi que des métadonnées s'y rapportant (p.e. l'EPSG Code). La translation est donnée dans les attributs *Easting*, *Northing* et *OrthogonalHeight*,

<sup>1</sup> European Petroleum Survey Group Geodesy (EPSG): système mondial univoque de description de systèmes de référence de coordonnées ou d'autres données géodésiques (ellipsoïde de référence, système de projection, etc).

l'éventuelle rotation dans *XAxisAbscissa* et *XAxisOrdinate* et l'éventuelle échelle (pour la planimétrie uniquement) dans *Scale*.

Condition préalable à un géoréférencement exact : l'application correcte de séquences de transformations relatives (*IfcLocalPlacement*) entre éléments, étages, bâtiments, chantiers et ceci avant que soient appliqués les paramètres de transformation. Ce positionnement relatif correct est en général opéré par l'application de création. Ce qui manque encore dans le schéma IFC, selon Clemen et al. (2019), c'est un concept pour la description d'un réseau de points fixes, de points de points de contrôle, ainsi que la possibilité d'opérer une transformation en trois phases dans des projets comportant plusieurs ouvrages dans une petite zone commune.

L'utilisation des objets (classes, types) définis dans le schéma IFC et leurs caractéristiques (attributs, propriétés) a pour avantage de rendre lisibles par un ordinateur les informations nécessaires à un géoréférencement, comme les métadonnées et les paramètres de transformation, et de les rendre directement lisibles et exploitables lors d'une implémentation logicielle. Ce n'est cependant pas encore possible avec les actuels logiciels de BIM ou de SIT / SIG.

## 2.8 Recommandation pour la mise en oeuvre des techniques de mensuration

Les aspects les plus importants du chapitre sont résumés ci-après:

Le réseau de points fixes représente la réalisation du cadre de référence des coordonnées du projet et par là-même l'interface entre le plan et la réalité. Une matérialisation et une détermination par des professionnels sont les conditions nécessaires pour une haute précision et pour la fiabilité. Les coordonnées dans le système de coordonnées du projet et dans le système de coordonnées géodésique d'ordre supérieur sont données comme données sémantiques, explicitement comme des valeurs caractéristiques. Géométriquement, les points fixes sont définis comme des pyramides dans le modèle de spécialité de géomatique.

Le modèle de spécialité de géomatique contient toutes les données qui sont de la responsabilité du géomaticien. Outre le réseau de points fixes, ces données peuvent également être constituées de données existantes en 3D, de données liées aux implantations ou d'autres informations à caractère géographique.

Le flux de données basé sur un modèle joue un rôle central dans la méthode BIM, aussi bien lors de l'acquisition des données de base que lors de la livraison des résultats. Cela conduit à des changements considérables dans les habitudes de travail et à des modifications dans les processus.

**Le réseau de points fixes** constitue la base pour les relevés et/ou les implantations. Il concrétise, sur le terrain, la réalisation du cadre de référence des coordonnées du projet et fournit ainsi l'interface entre le plan et la réalité du terrain. La plupart du temps un tel réseau est réalisé au tachéomètre. Comme déjà mentionné, pour la construction de bâtiment ou d'ouvrages de petites dimensions, on choisit en général un système de coordonnées local, sans déformation et sans changement d'échelle. Cela signifie que toutes les coordonnées locales du projet peuvent être transférées dans le système de coordonnées d'ordre supérieur au moyen d'une transformation en planimétrie et en altimétrie avec, éventuellement, une rotation.

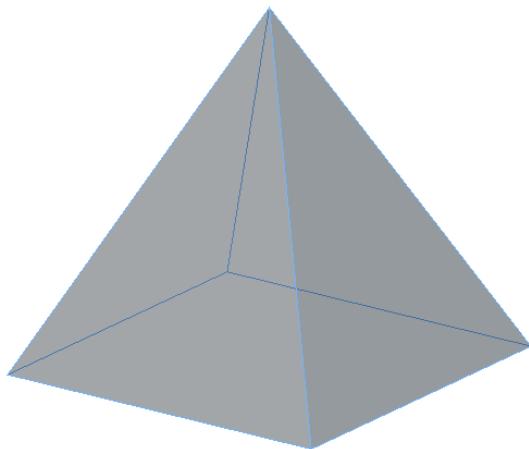
Lors de la détermination du réseau de points fixes sur la base des points limites et des points fixes de la mensuration officielle, des tensions peuvent survenir en raison des différents systèmes de référence. Des déformations ou des différences locales peuvent également surgir en raison des tolérances de la mensuration officielle et/ou de mouvement de terrain. Pour ces raisons, il faut s'assurer d'une surdétermination et de l'utilisation de points bien répartis et représentatifs des contraintes locales. Pour de petits projets, l'ajustage et l'évaluation peuvent se faire directement sur le terrain, en désactivant les réductions géométriques sur l'instrument, lors des stations tachéométriques. Il faut s'assurer, lors de la première mise en place de l'instrument, que l'on dispose d'une bonne répartition de points de la mensuration officielle. Par la suite, seuls les nouveaux points fixes doivent être utilisés.

Pour des projets plus importants ou complexes, nécessitant plusieurs stationnements de l'instrument, on procède à ce qui est appelé un «post processing», au moyen d'un logiciel de compensation de réseau basé sur les moindres carrés, permettant un calage en finesse. Une évaluation globale des résidus est alors également possible et d'éventuelles erreurs de mesures peuvent être détectées et éliminées. Les conditions météorologiques et, dans certains cas, d'autres influences relevant des techniques de mensuration, comme la sphéricité de la terre ou la déviation de la verticale peuvent être prise en compte.

Les points fixes doivent être positionnés de manière à rester visibles durant la durée totale des travaux et donc ne pas devenir inutilisables en raison de travaux liés à des phases de construction (installation de chantier, baraquements, palissades, voies d'accès, zones de déblais, de remblais ou zones de dépôt, etc). Des points fixes peuvent bouger pendant la durée des travaux. Cela peut être dû à l'influence du chantier lui-même comme par exemple lors d'un affaissement, d'une déformation liée à l'évacuation d'eau ou au retrait du béton. Par des mesures surabondantes et des contrôles réguliers, de tels comportements peuvent être mis en évidence et corrigés.

Il faut ajouter qu'un réseau de points fixes peut également être déterminé par des méthodes de mesures par satellites (GNSS). Il faut alors être conscient d'une précision moindre et s'assurer de la prise en compte de la cote du géoïde et de l'ajustage local. En pratique, la mise en oeuvre de cette technologie est plutôt rare.

Les coordonnées obtenues dans ce système de coordonnées d'ordre supérieur sont transformées dans le système de coordonnées du projet et tout comme les autres points (points de contrôle et PRefP) sont géométriquement représentés comme pyramides dans le modèle spécialisé de géomatique (Fig. 15). Outre les coordonnées elles-mêmes dans les deux systèmes, les données sur la précision, l'intégration, les mesures, le genre de matérialisation sont documentées dans le BAP et enregistrées comme Pset dans les données IFC (Fig.. 16).



*Fig. 15: représentation géométrique d'un point fixe à l'aide d'une pyramide*

| PSet_GeoRef      |                                     |
|------------------|-------------------------------------|
| Name             | FP01                                |
| LocalX           | 121.336                             |
| LocalY           | 38.978                              |
| LocalZ           | 2.998                               |
| Easting          | 2611035.513                         |
| Northing         | 1267907.564                         |
| OrthogonalHeight | 263.458                             |
| PSet_FixPoint    |                                     |
| Accuracy         | 3mm                                 |
| AdjustmentPoints | PFP1213,<br>PFP889 PFP19,<br>PFP890 |
| MeasurementDate  | 2020-11-25                          |
| Materialization  | Reflexzielmarke                     |

*Fig. 16: données sémantiques d'un point fixe comme PropertySet*

Le **modèle de spécialité de géomatique** contient toutes les données qui relèvent de la responsabilité du géomaticien. Outre le réseau de points fixes, il peut s'agir de données d'un levé effectué *in situ* (levé du terrain ou de bâtiments), de géodonnées 3D existantes (p.e. cadastre souterrain en 3D, modèle de bâtiment en 3D) ou de données relatives à des implantations. A ce stade, il est essentiel de fournir des métadonnées sous la forme d'un PSet IFC, métadonnées relatives à l'origine des données, la date de référence, l'actualité resp. la qualité des données et de les documenter dans le BAP.

Outre l'exécution professionnelle du travail, le **flux de données basé sur un modèle** joue un rôle central dans la méthode BIM. Dans l'acquisition des données comme base pour l'exécution du travail, il y a un changement de paradigme: passage d'une livraison à une obligation de collecte. Cela signifie que toutes les personnes impliquées dans le projet sont elles-mêmes responsables de tirer les informations dont elles ont besoin d'une plateforme de données centrale appelée *Common Data Environment (CDE)*. A cette fin servent généralement le modèle 3D en IFC et la documentation associée du BAP ainsi que tous les produits qui en découlent. Les interfaces online issues du cloud entre les instruments de mesures et l'environnement CDE permettent de rendre toujours plus efficace la relation avec le modèle, le BIM2Field resp. les implantations mais pas (encore) la documentation des travaux réalisés basée sur un modèle conforme à la structure des données. Malheureusement, cela se déroule encore de manière non structurée, c'est à dire sous forme de protocoles d'implantations isolés, au format PDF, plutôt que sous une forme structurée basée sur un modèle.

### **3. Remarque finale**

Les auteurs ont apporté tout le soin possible à l'élaboration du présent document. Si le lecteur constate des erreurs ou s'il a des propositions d'amélioration, il est prié de les faire parvenir à l'adresse suivante : [info@igs-ch](mailto:info@igs-ch). Elles seront reçues avec plaisir et intérêt.