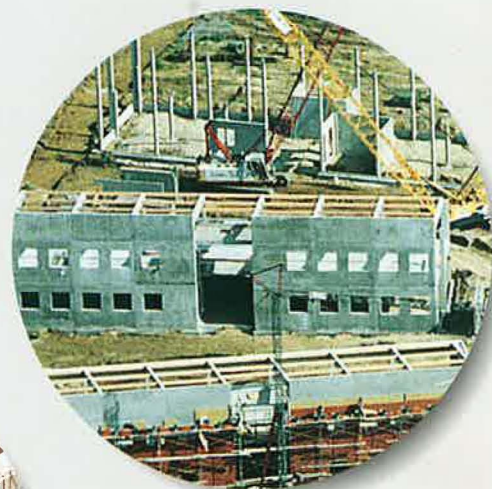


CONSTRUIRE EN BETON PREFABRIQUE



Guide de conception

"C'est lors de la préparation de notre dossier d'exécution que nous déciderons de réaliser notre projet en béton coulé sur place ou en béton préfabriqué... Quelle est l'alternative ? Poursuivre notre étude en collaborant avec un seul producteur et adapter notre projet à l'offre de produits de ce producteur ? Privilégier le processus de production par rapport aux intérêts du maître d'ouvrage ?..."

Voilà des propos qui s'entendent encore bien souvent. Pourtant, ni reporter la décision de construire en béton préfabriqué à la phase d'adjudication, ni adapter le projet en fonction des possibilités d'un seul producteur ne sont des démarches judicieuses.

Lors de l'élaboration du projet, il convient de garder à l'esprit la possibilité de réaliser le travail en béton préfabriqué, sans pour autant se lier à un seul producteur.

Le béton préfabriqué dispose d'un nombre d'atouts. Le béton en lui-même présente de nombreuses caractéristiques intéressantes: résistance mécanique, résistance au feu, isolation acoustique, capacité thermique, aspects variés, longue durée de vie, entretien limité,...

La préfabrication ajoute encore d'autres avantages: meilleure qualité du produit fini aux caractéristiques mieux contrôlées, absence de coffrage in situ, montage rapide, possibilité de recourir à la précontrainte, ...

La préfabrication du béton est cependant une technologie de production à part entière: il ne s'agit pas simplement d'une variante du béton coulé en place. Dès le début de l'esquisse, le concepteur devra avoir à l'esprit un certain nombre de "points de repère": le but de ce guide est de les mettre en évidence.

Les différents producteurs de béton préfabriqué disposent d'un savoir-faire spécifique, mais leur activité répond aux mêmes règles de base: l'auteur de projet n'est pas obligé de se lier à un seul producteur.

Ces diverses réflexions ont incité la Fédération de l'Industrie du Béton (FEBE) et la Fédération de l'Industrie Cimentière Belge (FEBELCEM) à publier ce guide en partenariat.

Le processus de conception

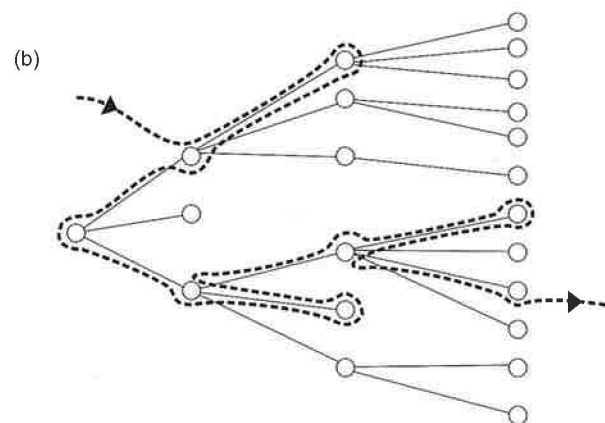
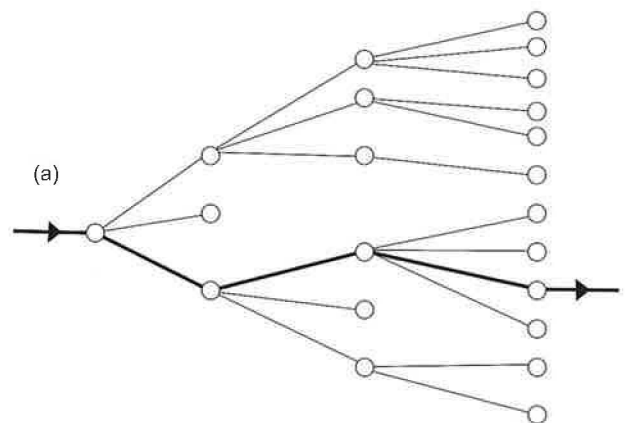
Beaucoup de réflexions ont été émises à propos du processus de conception: c'est un processus aussi évident que mystérieux... Evident, car on le rencontre quotidiennement: chaque jour, de "nouveaux" problèmes doivent être résolus, c.-à-d. des problèmes qui ne peuvent pas être réduits à des problèmes connus, pour lesquels il existerait déjà un schéma de résolution, découpé en étapes claires. Pour certains aspects d'un problème, des solutions partielles existent peut-être déjà, mais l'ensemble est sans précédent.

Les problèmes de conception sont caractérisés par le fait qu'au début de la mission, celle-ci n'est pas clairement définie: la mission intègre en fait la définition du problème. La manière dont les solutions doivent être évaluées n'est pas non plus fort claire. Quels sont les critères? Quelle importance ont-ils l'un par rapport à l'autre? Sont-ils indépendants? Sont-ils complets? Comment vérifier les performances vis-à-vis des critères? Etc.

Si la conception est une chose évidente, elle a aussi un côté mystérieux. Que se passe-t-il dans la tête du concepteur? Comment parvient-il à une solution créative? Existe-t-il une différence entre pensée associative et pensée analytique?...

Le processus de conception passe d'une vague identification des besoins et des désirs à la description détaillée d'une solution. Dans le cas de la conception d'un bâtiment, cette description est établie au moyen de plans, d'élévations, de coupes, de détails, de clauses de cahiers des charges et d'un métré.

Des options de bases sont prises puis développées progressivement. Il ne s'agit cependant pas d'une démarche linéaire (fig. a). Ainsi, il est parfois indiqué d'analyser certains détails dès le début de la conception, afin de contrôler la validité des options principales. Certaines options initiales doivent parfois être révisées après l'élaboration des détails (fig. b). Souvent l'expérience permet d'éviter des recherches inutiles; mais la routine peut, par ailleurs, également empêcher de découvrir des solutions originales.



Un guide de conception, six points de repère

Un guide de conception n'est certainement pas un manuel qui conduit, pas à pas, à une solution en suivant un parcours rectiligne : une telle approche tuerait le processus créatif.

Le présent guide reprend quelques points de repère que l'auteur de projet peut, à un moment donné, choisir ou non de suivre. Les thèmes ne sont pas indépendants les uns des autres. L'ordre d'utilisation des informations n'est pas imposé non plus : cela aussi pourrait figer la démarche.

Les thèmes suivants sont abordés :

- L'ossature et les éléments de remplissage : penser à long terme
- La trame : aide ou entrave ?
- Le canevas : portée et adaptabilité
- Le plan de masse : enveloppe et volume, contour et surface
- Les systèmes de construction : CAO, liberté de conception et efficacité de production
- Les équipements : une structure sous-estimée

Ces points de repères ne contiennent pas toutes les informations nécessaires à la conception en béton préfabriqué. Nous espérons cependant qu'ils offriront à l'auteur de projet un complément utile à des ouvrages de base généralement connus.

Bibliographie

Planning and design handbook on precast building structures
FIP (Fédération Internationale de la Précontrainte)
London : SETO, 1994

Brochure technique : éléments de plancher alvéolés en béton précontraint
Bruxelles : FEBE, 1989

Éléments en béton architectonique - Recommandations techniques
Bruxelles : FEBE, 1991

NBN B04-001 - Coordination dimensionnelle dans le bâtiment
Bruxelles : IBN, 1981

BOEKHOLT J.T. ; THYSSEN A.P. ; DINJENS P.J.M. ; HABRAKEN N.J.

Denken in varianten, het methodisch ontwerpen van dragers
Alphen aan de Rijn : Samsom, 1974

BRUGGELING A. S. G.
Prefabricage in beton
Amsterdam : Elsevier 1977

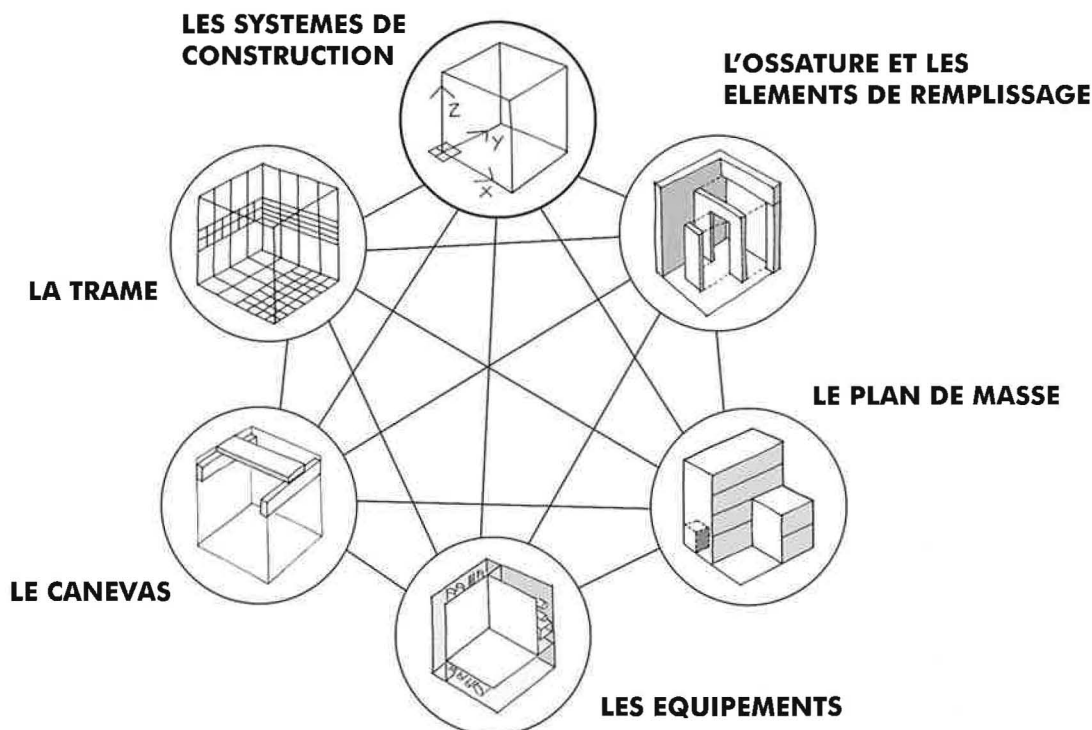
DE TROYER F.
Kostenbeheersing doorheen het ontwerpproces, de elementenmethode en BB/SfB
in : *Vademecum voor architecten*, afl. 3, déc. 1992, p. C50/1 - C50/30

HABRAKEN N.J.
De drager en de mensen : het einde van de massawoningbouw
Amsterdam : Scheltma en Holkema, 1961

HAVENNE D. ; SIMON F. ; DE TROYER F. ; NEUCKERMANS H.
Tables BB/SfB 1990 - Système de classification spécifique au secteur de la construction
Bruxelles : Régie des Bâtiments, 1990

MANNING P.
Industrial production buildings : a general approach to design
in : *The Architect's Journal*, avril 1966 et suiv. (p. 911-)

NEUCKERMANS H.,
Ontwerpmethodiek
Leuven : Acco, 2001



*'Construire en béton préfabriqué - Guide de conception' (6 fascicules) est publié par
FEBELCEM (Fédération de l'Industrie cimentière belge) et
FEBE (Fédération de l'Industrie du Béton)*

*Auteurs: F. De Troyer (KULeuven) ; N. Naert (FEBELCEM)
Rédaction finale de la version française : M. Lejeune (UCL)
Ed. resp.: J.P. Jacobs, rue Volta 8, 1050 Bruxelles*

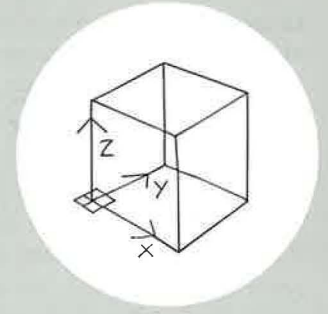
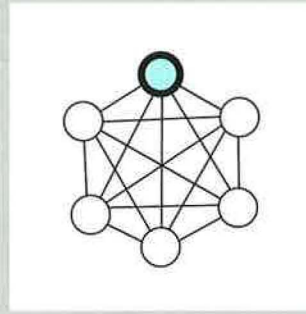
*Dép. légal: D/2002/0280/15
ISBN 90-807148-2-8*

*www.febelcem.be – info@febelcem.be – tél. 02 645 52 11 – fax 02 640 06 70
www.febe.be – mail@febe.be – tél. 02 735 80 15 – fax 02 734 77 95*



Les systèmes de construction: CAO, liberté de conception et efficacité de production

Les équipements
L'ossature et les éléments de remplissage
La trame
Le canevas
Le plan de masse



Union Minière, Olen - arch. J. Gillès



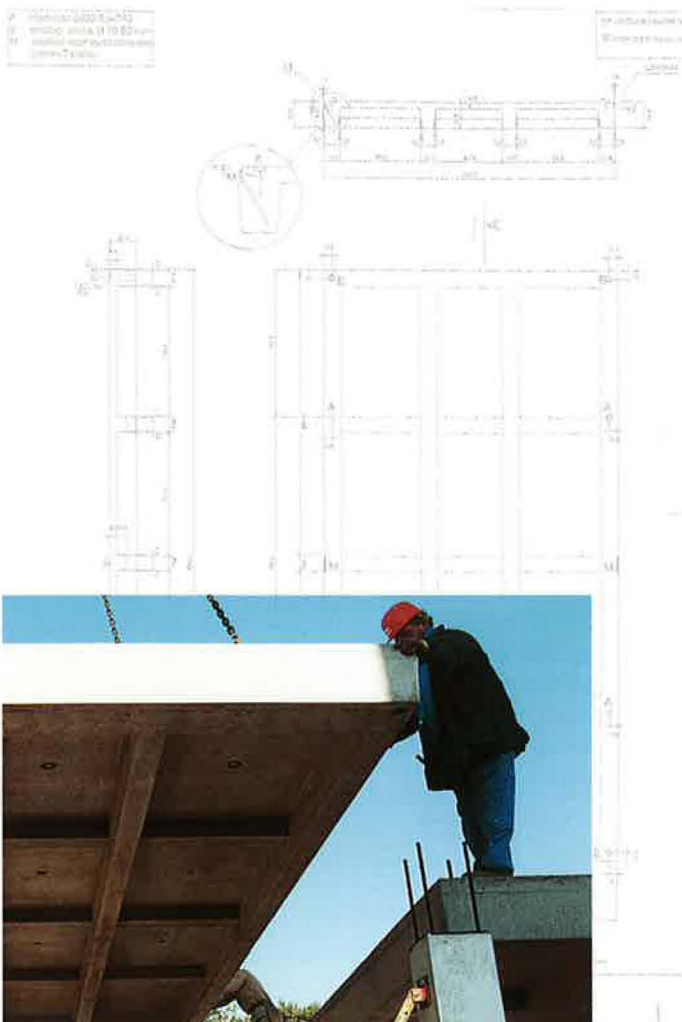
"Grâce à l'informatisation et à l'automatisation, nous exécutons du travail sur mesure au prix de produits de série!" Ce slogan s'entend de plus en plus souvent, mais, la plupart du temps, il n'est pas justifié...

Techniquement, beaucoup de développements sont possibles, mais tout a son prix: plus un robot est polyvalent, plus il est cher. Là où beaucoup de variation est exigée, la flexibilité de l'opérateur humain semble encore très compétitive par rapport à celle de robots.

L'évolution vers l'automatisation est indéniable. Le secteur du béton préfabriqué utilise déjà depuis longtemps des centrales de malaxage entièrement automatiques, des systèmes de transport de béton gérés par ordinateur, des coffrages qui s'ouvrent et se ferment hydrauliquement, des tables de coffrage en carrousel, des robots pour le montage d'éléments...

De même, dans le domaine de l'architecture, la création informatisée de plans d'exécution, de détails, de textes de cahiers des charges et de dessins de présentation est devenue très courante. Dès la phase de conception, des programmes informatiques offrent la possibilité de vérifier rapidement toute une série de performances et de comparer diverses variantes. De tels calculs de contrôle ne se limitent plus désormais aux comportements mécaniques de diverses parties de bâtiment (capacité portante, contraintes de flexion, déformations engendrées par le retrait et fluage...). La consommation d'énergie, les ponts thermiques, le prix de revient et d'autres critères qualitatifs tels que la lumière du jour, l'ensoleillement, l'environnement sonore, l'efficacité de la circulation, la forme, l'espace, les vues, l'impact sur l'environnement,... peuvent également être analysés au moyen de modèles virtuels.

Parallèlement à cette évolution, la communication entre le concepteur, le producteur et l'entrepreneur devient plus efficace. Ainsi, déjà dans la phase d'esquisse, le concepteur peut envoyer un modèle 3D par l'intermédiaire d'un support électronique (disquette, CD-ROM, e-mail) et recevoir rapidement une réponse à propos des études techniques préliminaires, d'une estimation du prix, d'une première planification,...



La période qui a suivi la deuxième guerre mondiale était caractérisée d'une part, par un secteur de la construction déséquilibré et, d'autre part, par une demande importante : réparation des dégâts de la guerre, développement économique spectaculaire provoqué par le plan Marshall, croissance démographique importante...

Les possibilités énormes de la production de masse dans d'autres secteurs ont porté à croire que la même approche serait aussi la solution dans le secteur de la construction: les usines d'assemblage de voitures ont souvent été citées en exemples. Cette approche devait conduire à la préfabrication, à un assemblage minimum sur le chantier, au remplacement des métiers traditionnels par des machines, à l'emploi de travailleurs sans formation et de travailleurs d'une 'nouvelle école', et enfin, à l'application de nouveaux matériaux et au développement de nouveaux produits.

Les systèmes fermés

De nombreux systèmes de construction en béton préfabriqué ont été développés. Dans les années soixante, ces systèmes étaient décrits comme des systèmes de construction fermés. Dans un système fermé, un projet de construction entièrement élaboré était divisé en un certain nombre de composants, produits spécialement dans le cadre de ce projet. Un bloc d'appartements était, par exemple, divisé en parois extérieures, parois intérieures, dalles de sol et escaliers en béton. Evidemment, lors de la conception de ces composants, tous les raccords entre les éléments devaient être bien étudiés.

L'entreprise qui fournissait un tel système de construction était spécialisée dans une technologie de production en béton et les autres composants étaient achetés. Les parties achetées telles que portes, fenêtres, appareils sanitaires,... devaient donc s'intégrer dans les éléments produits dans l'entreprise.

La variation était limitée : les séries de production étaient de préférence les plus grandes possibles. La monotonie qui en découlait a conféré au terme "fermé" une connotation fort négative.

Les systèmes semi-ouverts

Les systèmes de construction semi-ouverts ont alors fait leur apparition. Suivant cette approche, le projet était également divisé en éléments. Toutefois, en respectant une systématique dimensionnelle bien déterminée de ses propres composants, le préfabricant se réservait la possibilité d'incorporer des produits de différents fournisseurs indépendants. Par exemple, si les baies de portes et de fenêtres étaient des multiples d'un module particulier, la concurrence devenait possible entre les fournisseurs.

Les systèmes ouverts

Dans un stade ultérieur, les systèmes de construction ouverts ont été développés. Par rapport aux systèmes précédents, la démarche est tout à fait différente. Ce n'est pas un projet donné qui sert de point de départ, mais une série de composants qui peuvent être combinés de différentes manières. Grâce à ces composants ou éléments, un nombre indéterminé de combinaisons peut être réalisé dans plusieurs projets.

Bien sûr, cette gamme d'éléments est tantôt plus grande, tantôt plus petite : elle permet parfois plus, parfois moins de variations. Toutes les configurations d'assemblage entre les

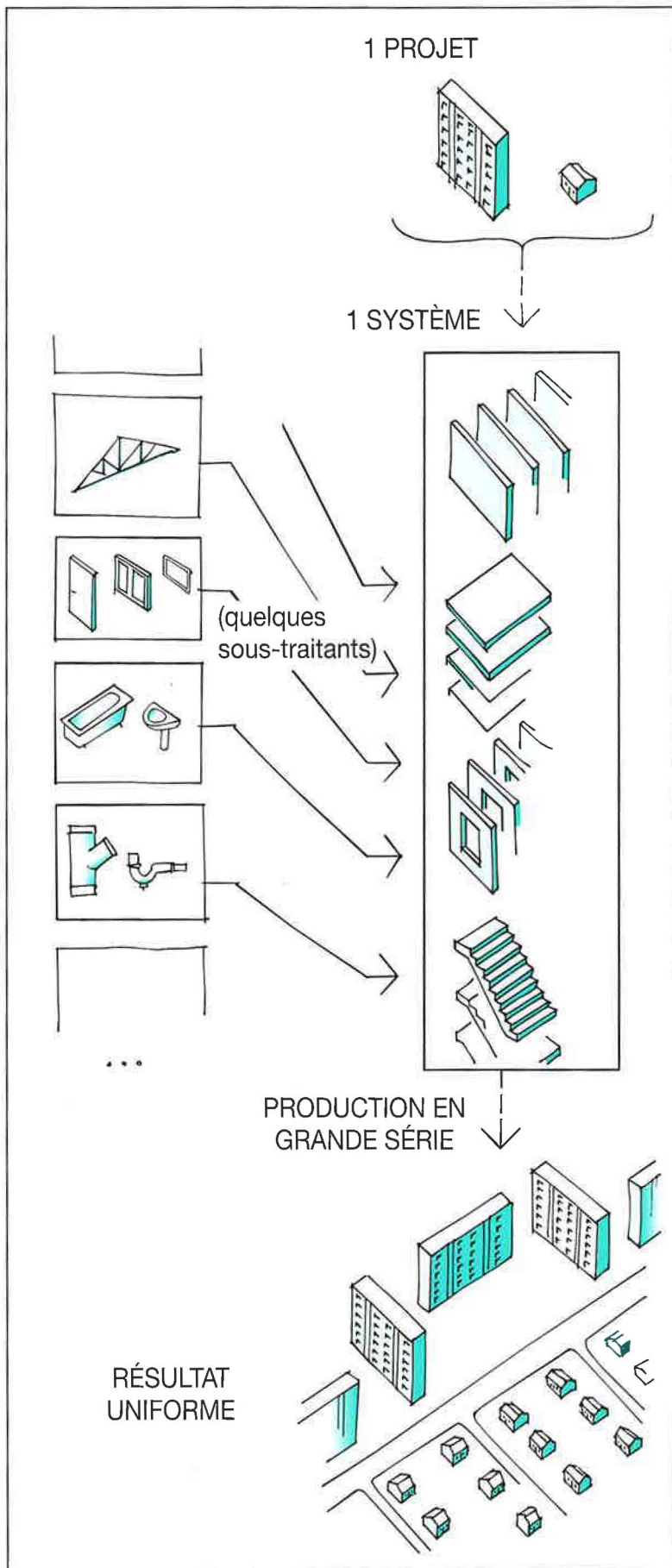
planchers, les parois extérieures et intérieures sont réalisées en suivant certaines règles.

Un '*guide de conception*' explique au concepteur les règles ou contraintes dont il devra tenir compte, s'il veut que son projet soit réalisable, en ayant recours à ce système de construction. Un '*catalogue d'éléments*' contient un aperçu systématique des éléments disponibles. Chaque système de construction ouvert est accompagné de son propre guide de conception et de son catalogue d'éléments.

Bien sûr, comme pour les systèmes de construction semi-ouverts, des composants et sous-systèmes provenant de fournisseurs indépendants peuvent également être incorporés.

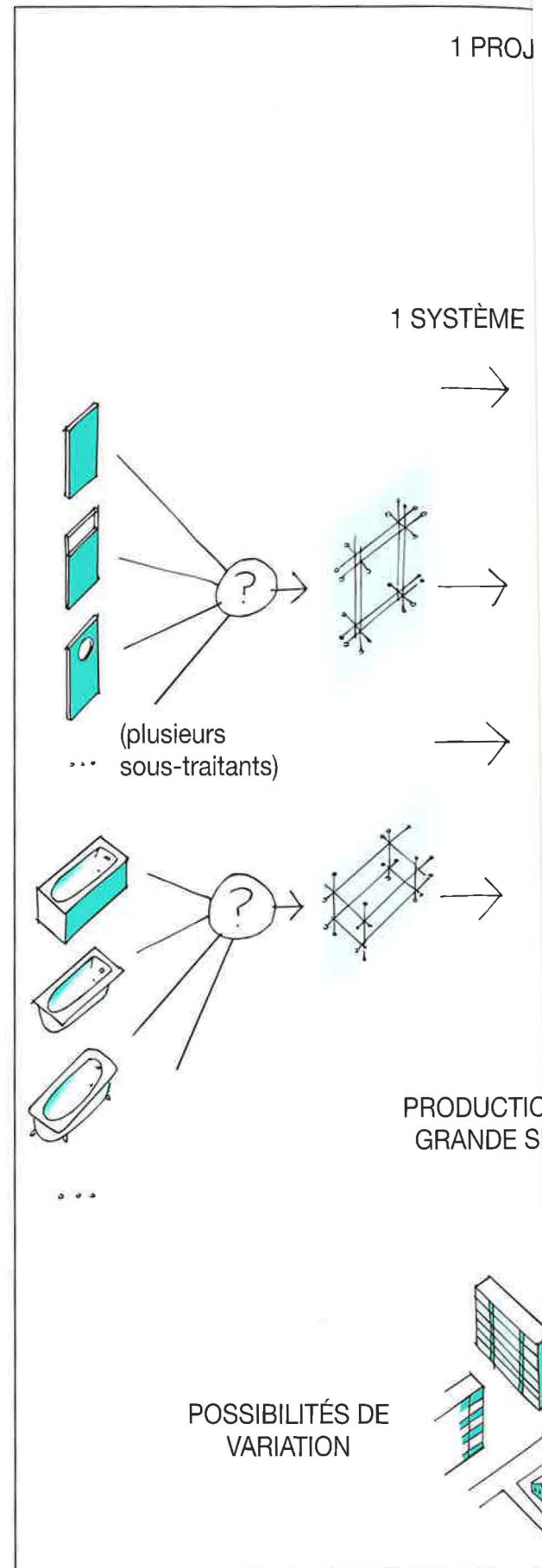
Dans le cas d'un système de construction ouvert, il est important que toutes les liaisons possibles soient prévues. Ainsi, les éléments nécessaires peuvent être directement déduits de l'esquisse. Il est encore plus important que l'appareil de production soit perfectionné afin de permettre, à des coûts réduits, des modifications prévisibles. Dans son guide de conception, le producteur indique les restrictions imposées qui permettent de réduire les frais de production. Les principes du système de construction ouvert créent le cadre d'une informatisation et d'une automatisation plus avancées.

- Grâce aux outils offerts par des logiciels de CAO (par exemple, ceux permettant la fixation de trames), le concepteur peut plus facilement tenir compte des règles du système de construction.
- Même si un projet est introduit de manière très schématique, l'ordinateur peut automatiquement traduire ces schémas en dessins détaillés. Il suffit, par exemple, de représenter un mur par un rectangle perpendiculaire à une trame horizontale. Toutes les caractéristiques du mur, des performances mécaniques, thermiques, acoustiques... peuvent être associées au rectangle représentant le mur. Les baies de portes et fenêtres, les dormants, etc. sont également dessinés comme de simples lignes et surfaces. Les équipements à encasturer, tels que les interrupteurs et les prises, sont représentés schématiquement.
- Au moment où l'ordinateur transforme ces dessins schématiques en dessins d'exécution classiques, dans le cas des éléments en béton par exemple, il signale les points sur lesquels le guide de conception n'a pas été respecté.
- A partir du même modèle, les dessins de production sont également générés automatiquement. Il s'agit de dessins qui sont utilisés à tous les stades du processus de production des éléments.
- A partir du même modèle encore, on peut déduire des relevés des pièces tels que, par exemple, des listes de commandes des vitres, des listes comprenant des traverses et des montants de portes et de fenêtres. A partir de ces informations, des machines à commande numérique peuvent produire automatiquement ces portes et fenêtres.
- Toujours à partir du même modèle, toutes les données peuvent être déduites afin d'effectuer une planification globale du processus de production et ce jusqu'à, par exemple, l'optimisation de l'occupation des tables de coffrage.



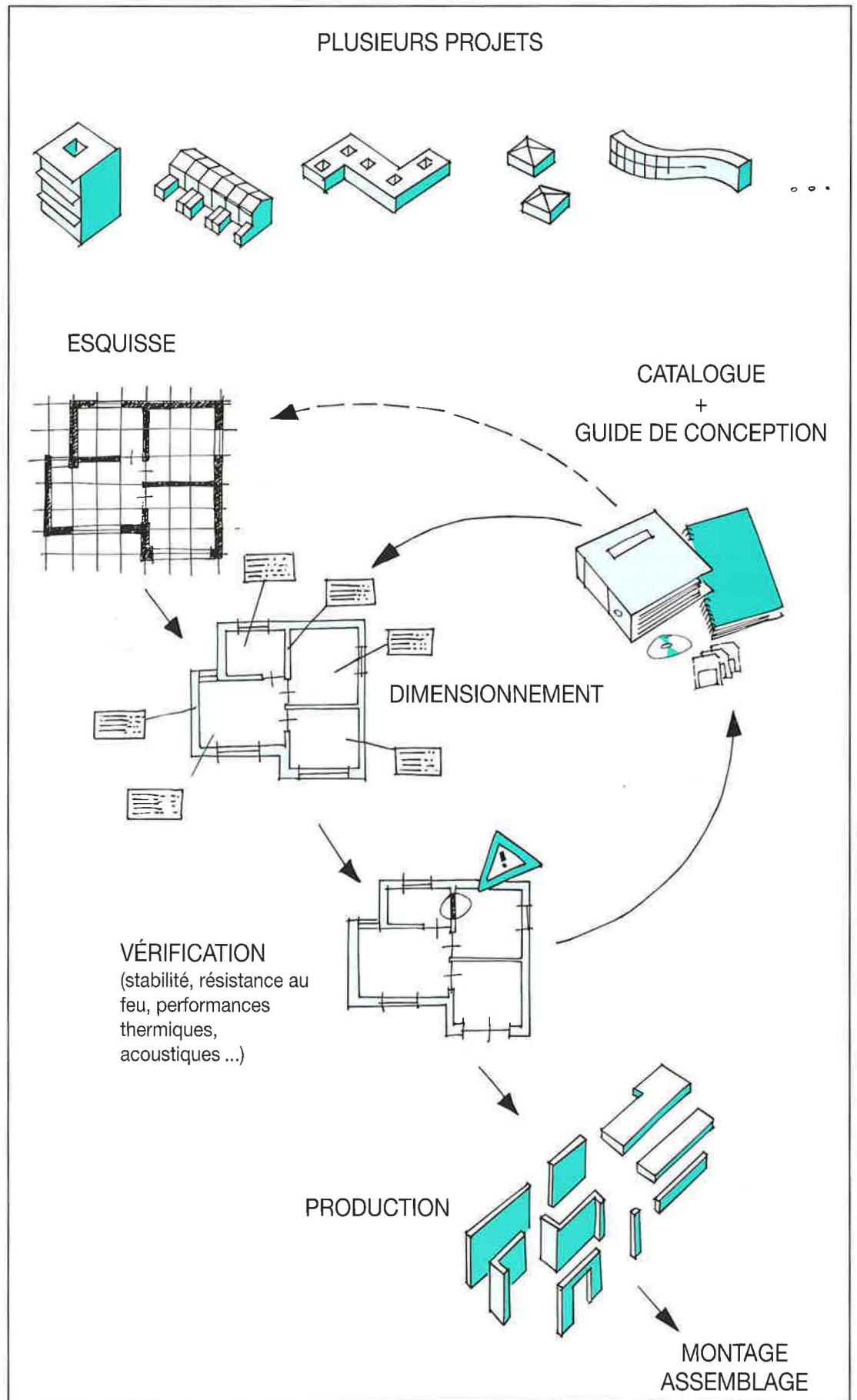
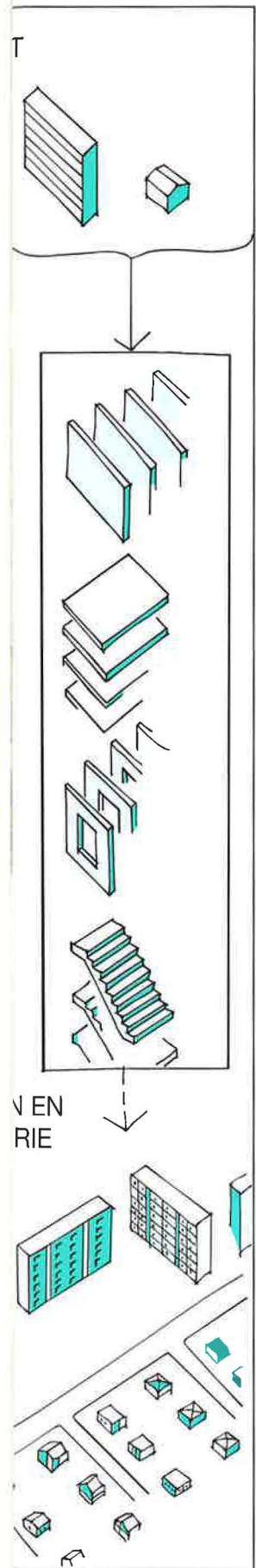
SYSTÈME DE CONSTRUCTION FERMÉ

Le projet est entièrement élaboré puis décomposé en éléments. Ces éléments sont spécialement conçus et produits en fonction d'un nombre limité de bâtiments types.



SYSTÈME DE CONSTRUCTION SEMI-OUVERT

Le projet est également entièrement élaboré puis décomposé en éléments. Cette systématique dimensionnelle offre la possibilité d'incorporer de nombreux sous-traitants.



SYSTÈME DE CONSTRUCTION OUVERT

Avec une même série d'éléments, différents projets peuvent être réalisés. Le catalogue montre tous les éléments disponibles, le guide de conception explique les règles et contraintes dont l'auteur de projet doit tenir compte.

L'industrialisation ouverte

Chez beaucoup de concepteurs, un tel scénario fait sans aucun doute surgir la crainte de devoir se lier à un seul producteur et à son système de construction même "ouvert". C'est pour répondre à cette crainte qu'une nouvelle évolution s'est opérée : le passage du système de construction ouvert à l'*industrialisation ouverte*.

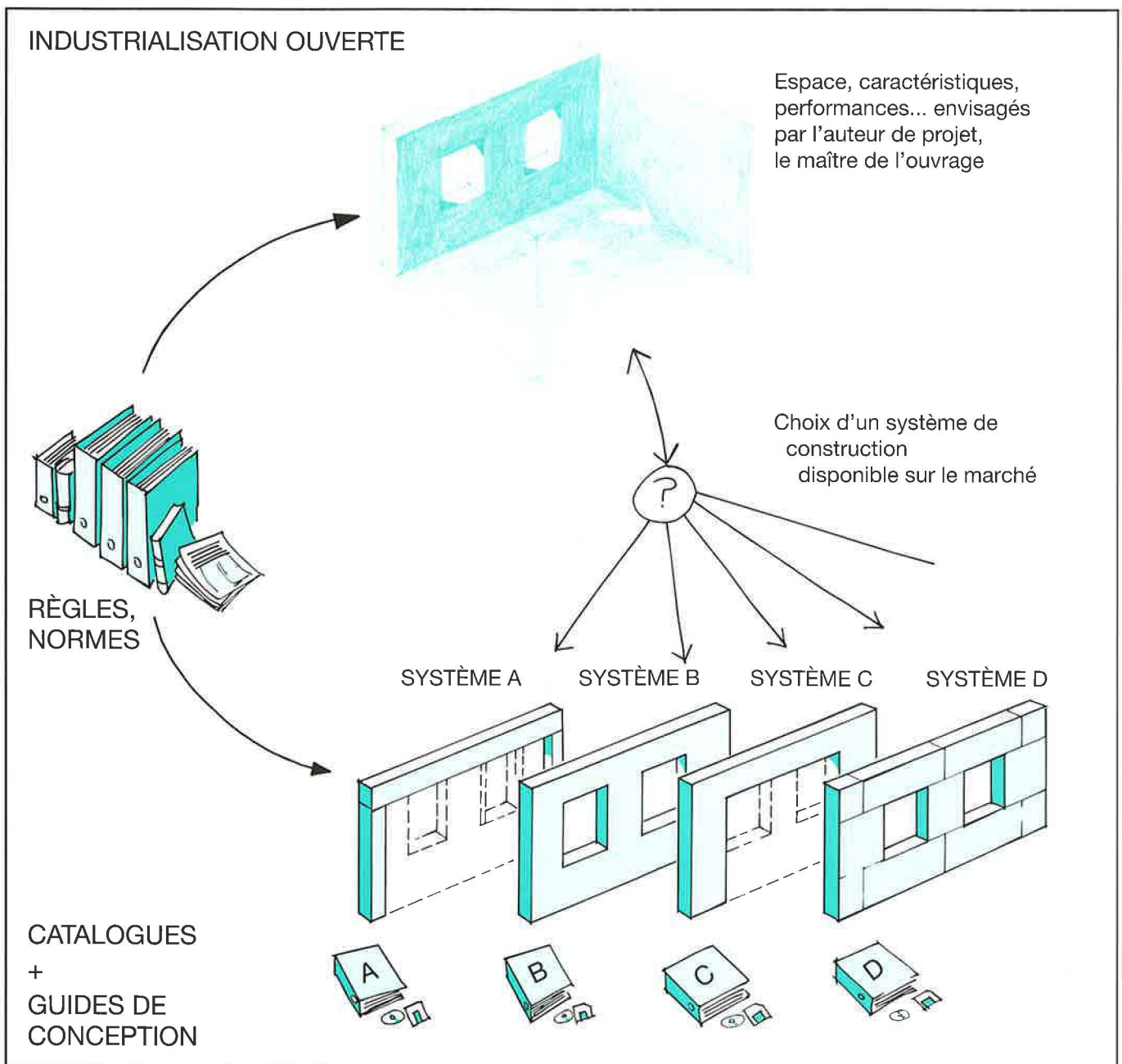
Dans le cas de l'industrialisation ouverte, plusieurs règles et conventions sont formulées à destination de l'ensemble du secteur de la construction. Il s'agit, entre autres, des conventions qui concernent la systématique dimensionnelle modulaire, telles que la terminologie de base, le choix de multimodules et de sous-modules, les conventions des modes d'assemblage et des joints,... A côté de ces conventions essentielles, il importe évidemment d'établir d'autres règles qui concernent la stabilité constructive, les performances thermiques,...

Grâce à cet ensemble de règles générales, les produits de différents systèmes de construction sont interchangeables. Ainsi, des éléments de plancher peuvent, par exemple, être

utilisés aussi bien dans le cas de murs porteurs que dans le cas de systèmes comprenant des poutres et colonnes.

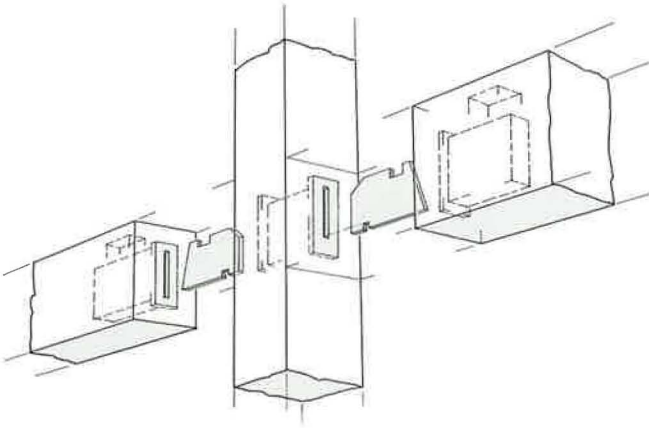
Certains sous-systèmes ouverts peuvent aussi être intégrés dans différents systèmes de construction ouverts. Par exemple, les fenêtres et les portes, les escaliers, les systèmes de parois de séparation, les systèmes d'équipements de cuisine, etc. sont tous adaptables dans divers systèmes de supports.

Les producteurs tout comme les concepteurs trouvent leurs intérêts dans de telles conventions et règles de conception. Elles offrent au producteur de systèmes de construction la possibilité d'intégrer pas à pas les technologies les plus avancées en vue de produire rationnellement. De son côté, le concepteur conserve la possibilité de choisir plus tard parmi les systèmes de construction tels que murs porteurs, systèmes de colonnes et de poutres, systèmes de portiques... L'échange d'informations, au stade de l'esquisse, permet d'évaluer les désirs du maître de l'ouvrage en connaissance de cause par rapport aux restrictions imposées par une production rationnelle.





a



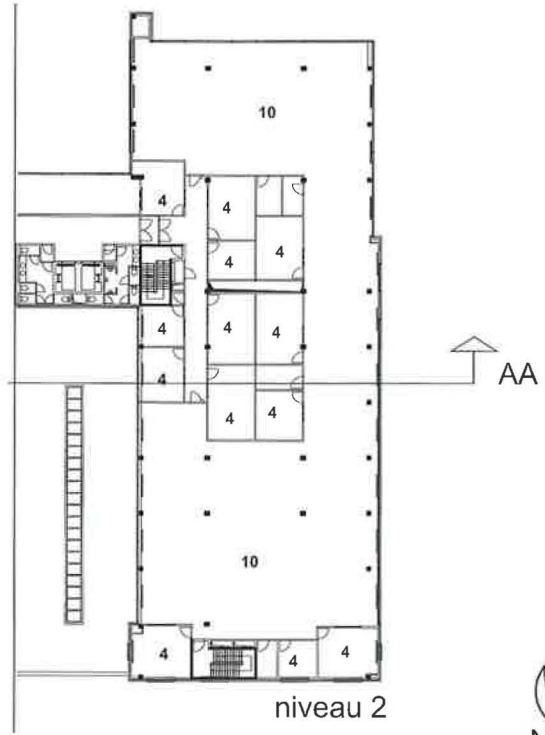
Exemples de systèmes de construction avec assemblage sec des éléments :

- colonnes et poutres (ci-dessus)
- colonnes et éléments de plancher (couverture)

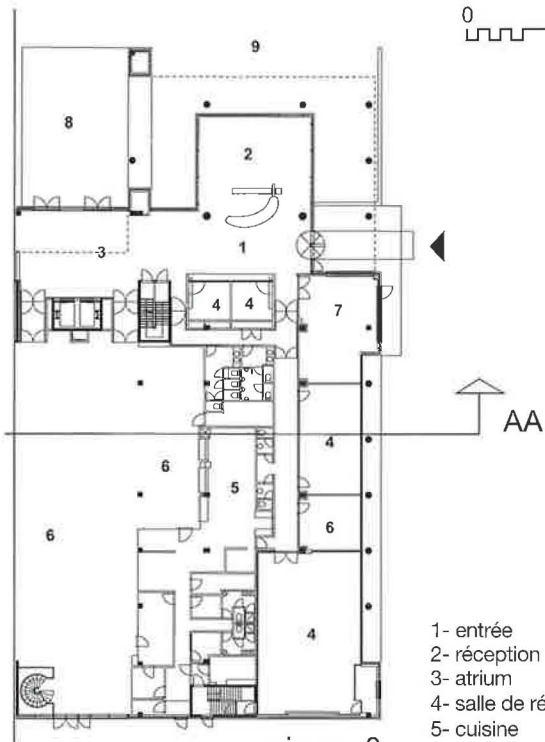
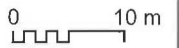
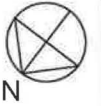
Les liaisons sont scellées au moyen d'un coulis de mortier.



b

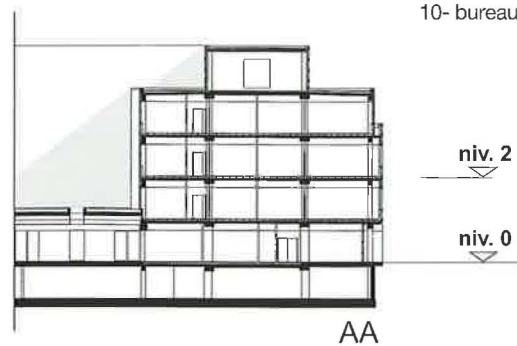


niveau 2



niveau 0

- 1- entrée
- 2- réception
- 3- atrium
- 4- salle de réunion
- 5- cuisine
- 6- restaurant
- 7- magasin
- 8- terrasse
- 9- pièce d'eau
- 10- bureau paysager



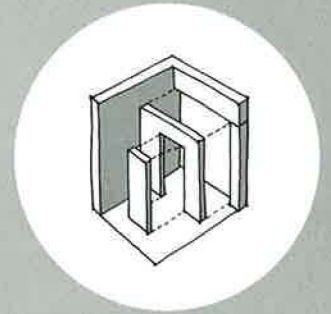
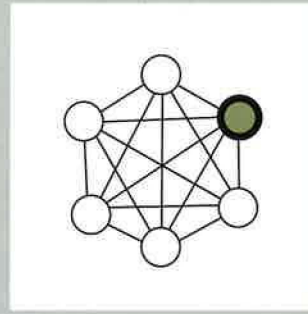
niv. 2

niv. 0

AA

L'ossature et les éléments de remplissage: penser à long terme

La trame
Le canevas
Le plan de masse
Les systèmes de construction
Les équipements



"La construction durable", c'est devenu un slogan... Après la Conférence de Rio sur le développement durable, nous avons de plus en plus pris conscience du fait que les réserves en matières premières ne sont pas inépuisables. Dans notre développement, nous devons en outre nous préoccuper de conserver des matières premières à destination des générations futures.

Le concept du développement durable comporte les aspects : *développement et durabilité*. Les deux termes ont leur importance : il s'agit de trouver un équilibre entre le progrès, auquel la société a droit, et le comportement à long terme.

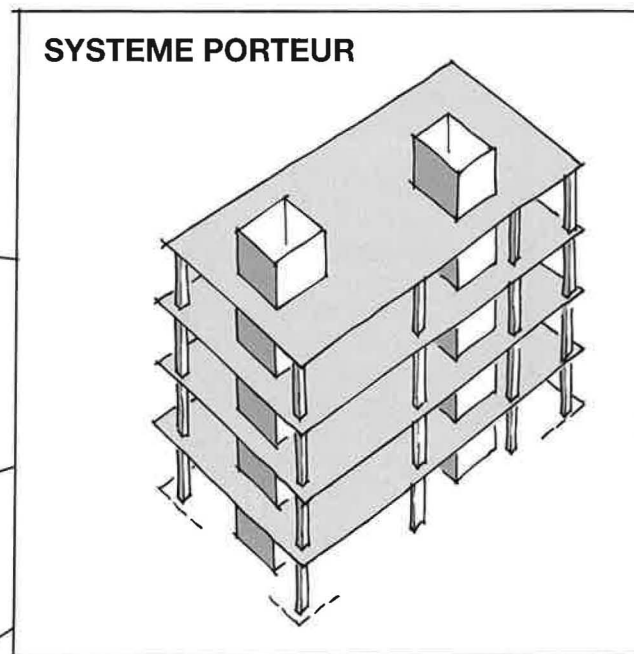
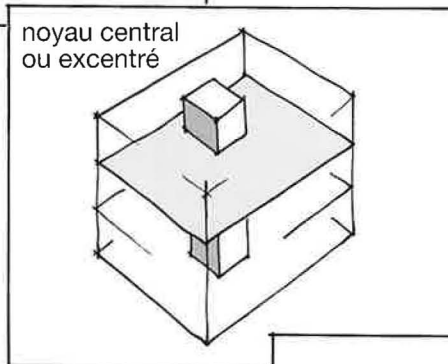
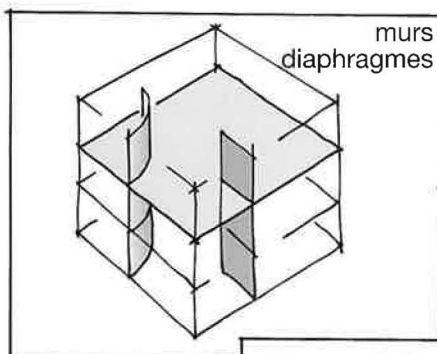
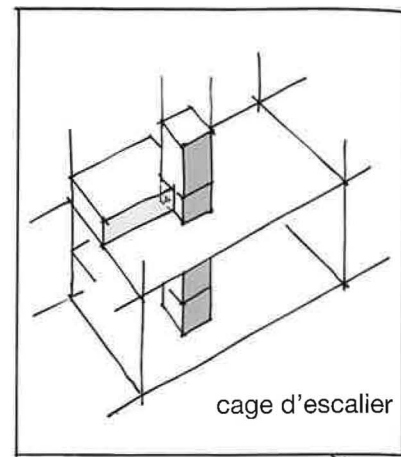
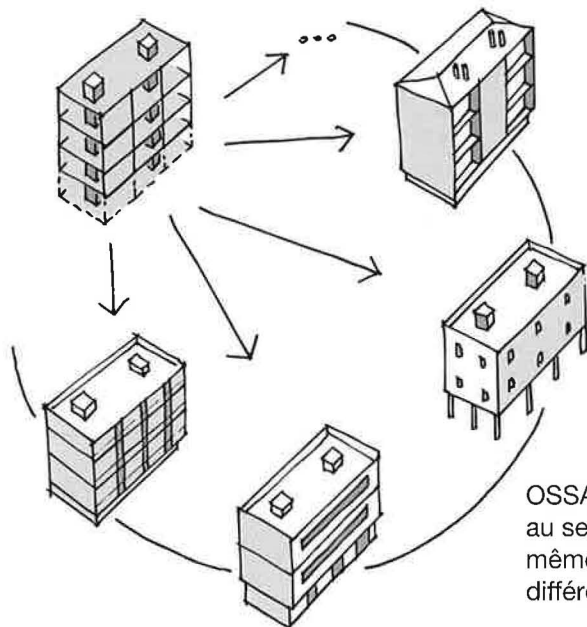
La construction durable appliquée à la *technologie du béton* a déjà abouti à des initiatives concrètes :

- l'utilisation de gravats et produits de démolition comme granulats recyclés permettant de réduire le volume de déchets et d'éviter d'entamer de nouvelles réserves de matériaux ;
- le recours à la construction démontable. Le but de cette approche est de démonter et réutiliser certains composants tels que éléments de façade, dalles de sol, poutres, colonnes, ... Cette voie conditionne les techniques d'assemblage et les aspects logistiques. Quelle est la nouvelle destination du composant démonté? Comment parvient-il à cet endroit? Où peut-il être entreposé en attendant d'être réemployé? ...

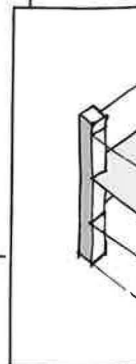
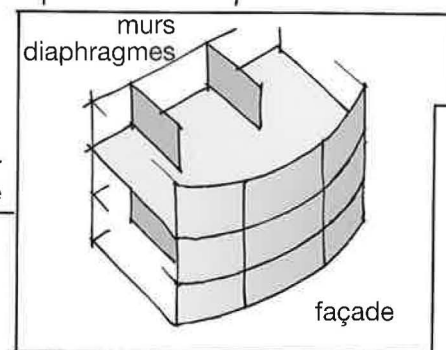
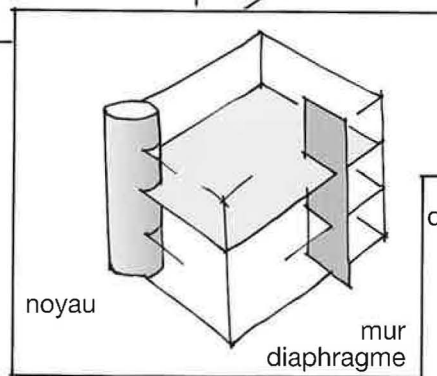
Le concept des bâtiments réutilisables est encore plus fondamental. Qui ne connaît des projets de reconversion

(suite p. 6)

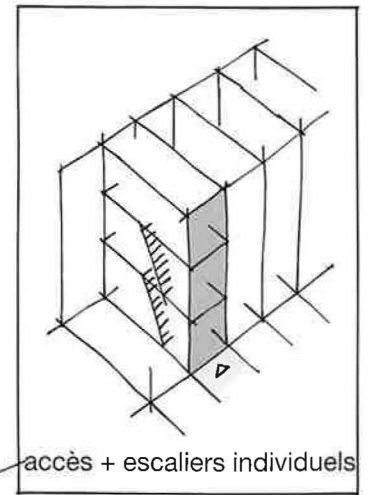
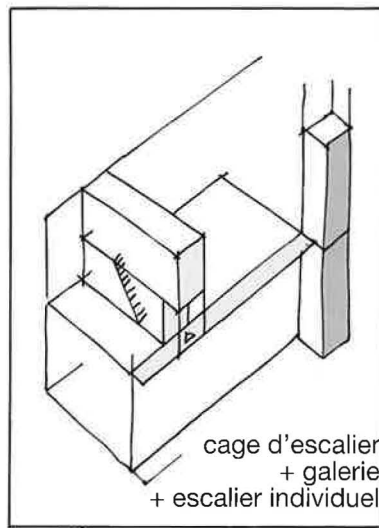
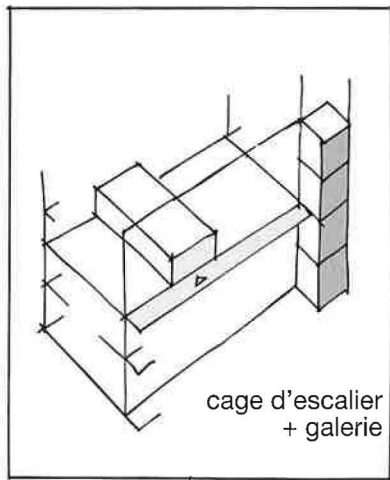
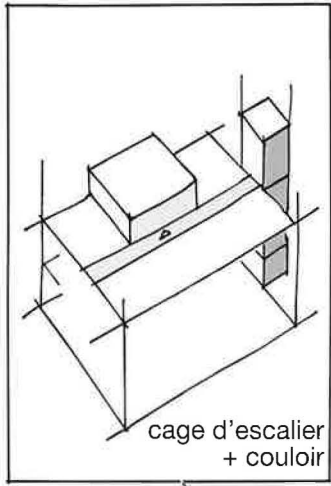




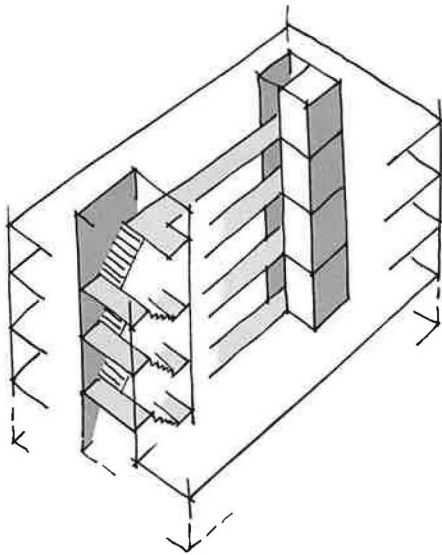
Exemples de systèmes porteurs: la stabilité du bâtiment est assurée par l'action diaphragme des planchers et des éléments verticaux raidisseurs (cages d'escaliers, murs, façades)



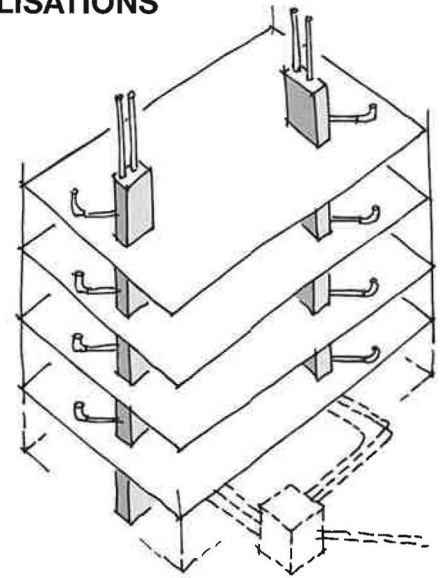
s et de circulation



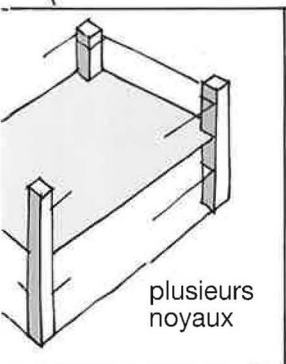
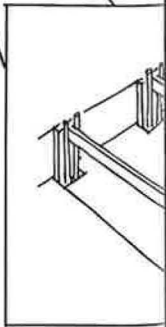
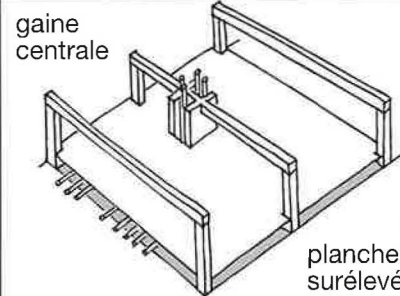
CIRCULATION



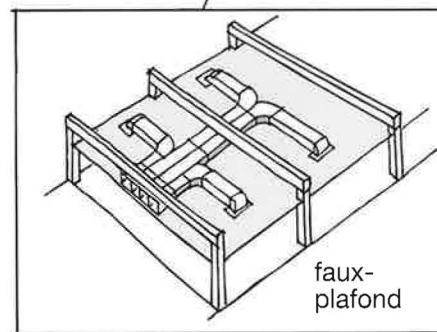
CANALISATIONS



OSSATURE/REPLISSAGE au sens élargi :
l'ossature comprend la structure porteuse, le système de circulation et les canalisations principales

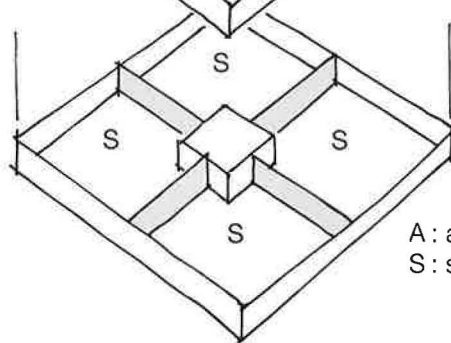
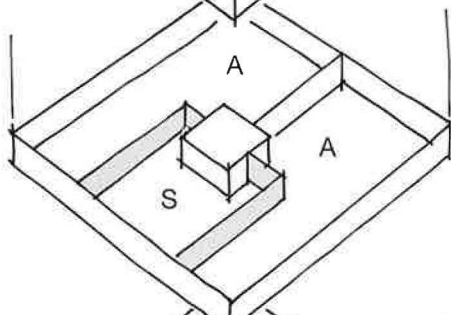
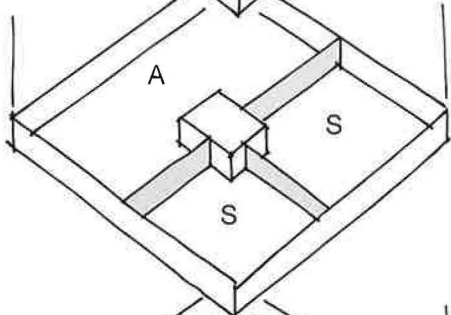
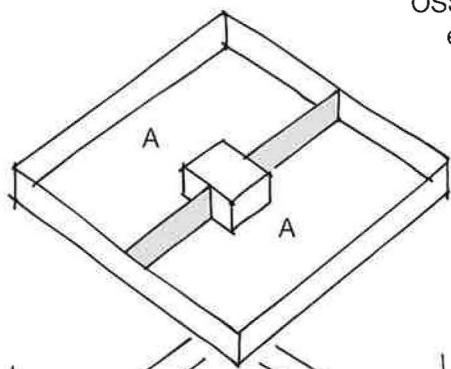


...

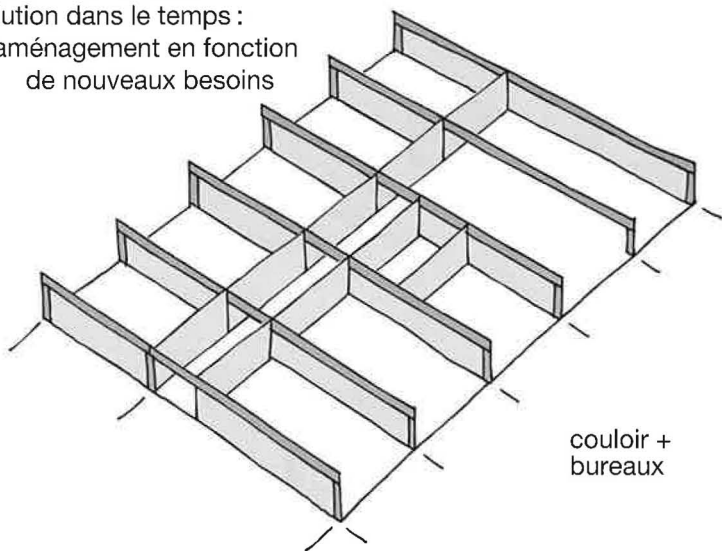


Exemples d'emplacements des canalisations/gaines

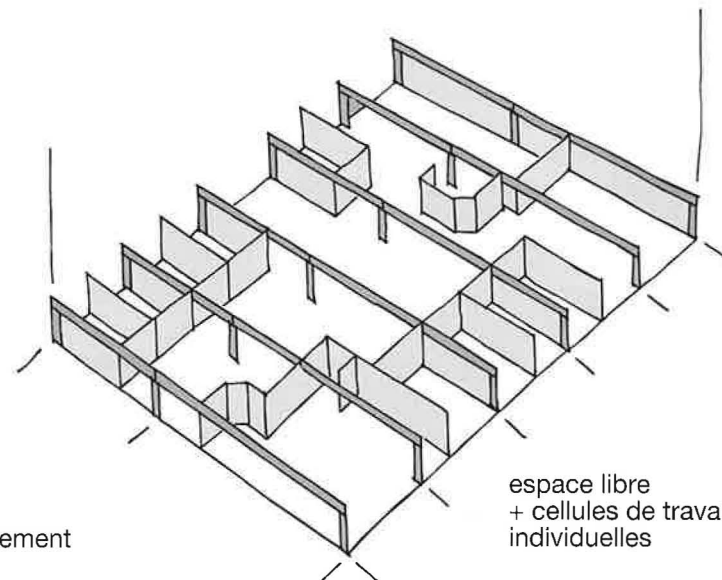
OSSATURE/REPLISSAGE
 et évolution dans le temps :
 réaménagement en fonction
 de nouveaux besoins



A : appartement
 S : studio

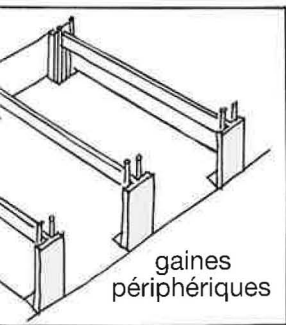


couloir +
 bureaux

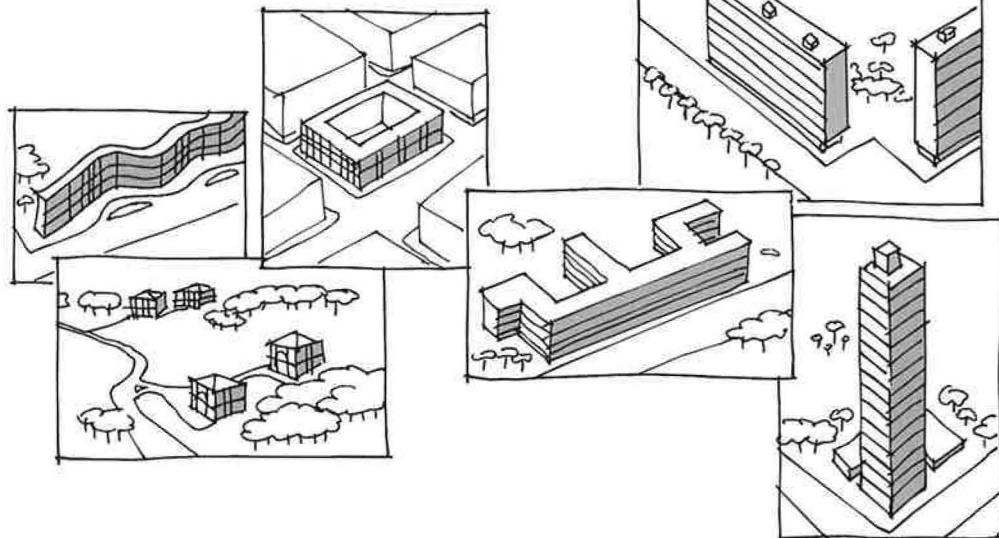
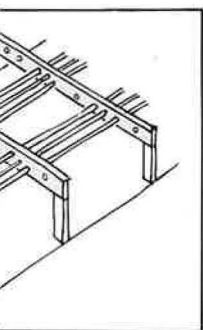


espace libre
 + cellules de travail
 individuelles

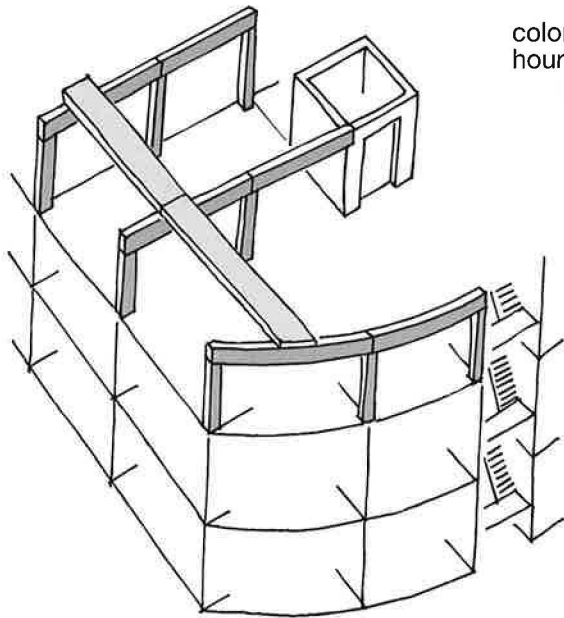
OSSATURE/REPLISSAGE à l'échelle du quartier :
 le projet s'inscrit dans une "structure porteuse"
 par le règlement urbanistique, la voirie et l'infrastructure existantes, etc.



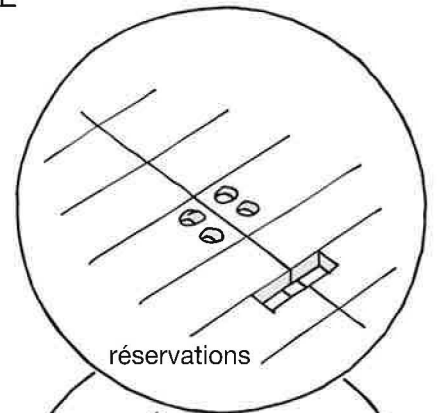
gaines
 périphériques



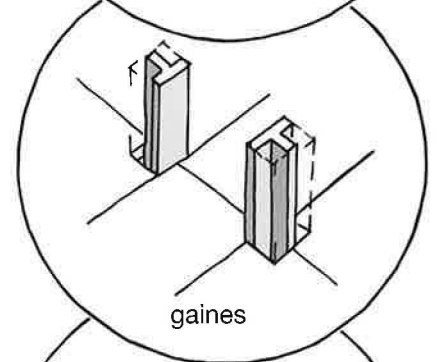
EXEMPLES DE STRUCTURES PORTEUSES EN BETON PREFABRIQUE



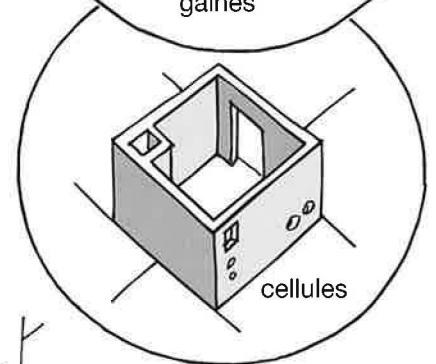
colonnes, poutres, hourdis



réservations



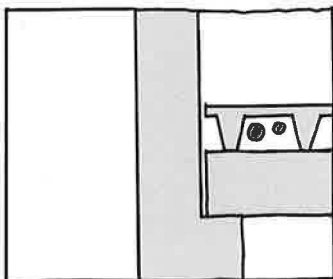
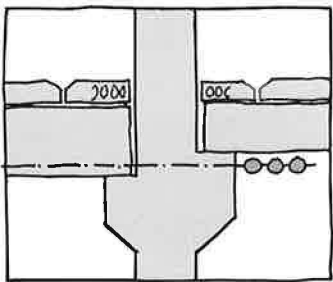
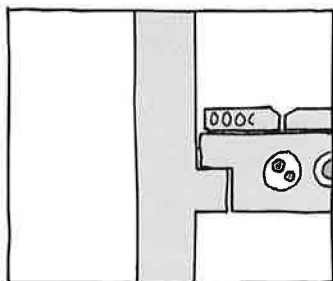
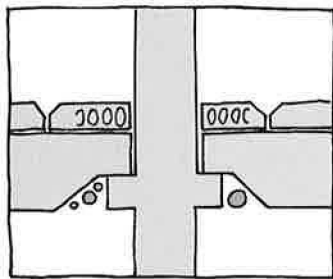
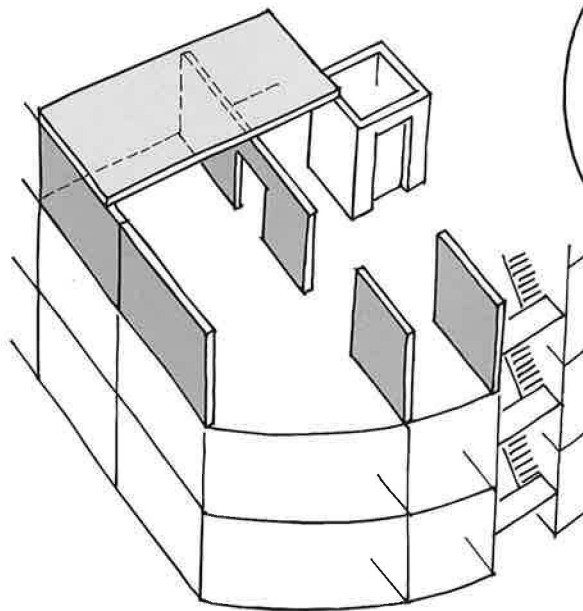
gaines



cellules

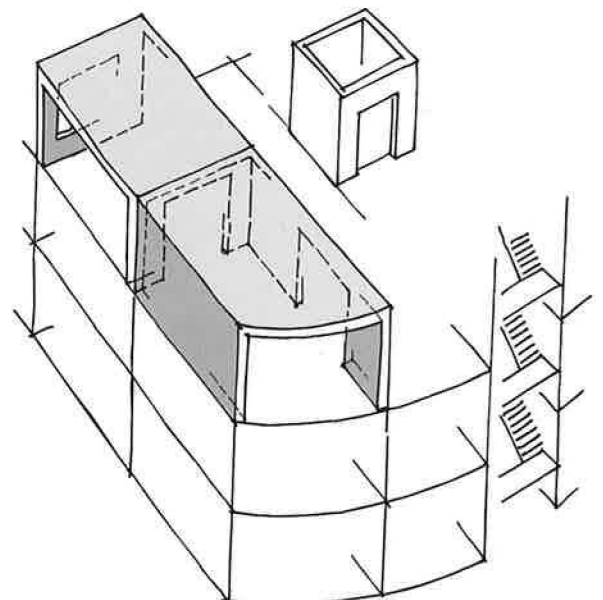
Emplacement des canalisations verticales

murs, voiles, panneaux, planchers, prédalles



Possibilités d'emplacement des canalisations horizontales

formes complexes, pièces entières



tels que : un couvent reconverti en centre de congrès, une maison de maître réaménagée en immeuble commercial et comprenant des appartements à l'étage, un bâtiment industriel transformé en habitations,...

Mais il ne faut pas seulement regarder ces projets de réhabilitation au caractère spectaculaire. Il arrive souvent que des immeubles de bureaux courants soient réaménagés en vue de satisfaire aux besoins de nouveaux utilisateurs ou en vue de répondre à des besoins qui ont fondamentalement changé.

En Grande-Bretagne, le concept *GPF* (*general purpose factory*) a été développé. Il s'agit d'un bâtiment polyvalent destiné à l'industrie légère et pouvant répondre aux exigences liées à divers types de processus de production. Dans le cas des immeubles d'habitation, les termes *ossature* et *éléments de remplissage* ('*drager*' et '*inbouw*') étaient déjà cités par Habraken (*SAR - Stichting Architecten Research*) en 1961.

Il semble que, dans le cas où les composants d'un bâtiment satisfont à un certain nombre d'exigences (stabilité, isolation acoustique, sécurité en cas d'incendie, ...), ces édifices aient automatiquement une longue durée de vie technique. Il faut partir du principe qu'un immeuble d'habitation *sera* transformé, qu'un bureau *sera* réaménagé. Il n'est donc pas toujours indiqué de réaliser l'ossature sur mesure en fonction du premier programme de construction.

Les composants qui ont une longue durée de vie sont regroupés ici sous le vocable 'ossature', tandis que ceux susceptibles d'être adaptés sont regroupés sous le vocable 'éléments de remplissage'.

Un utilisateur, comme une famille dans un immeuble à appartements ou une entreprise dans un immeuble de bureaux, par exemple, peut prendre des décisions concernant uniquement les éléments de remplissage: l'aménagement intérieur, les murs de séparation, les parties de façades non porteuses,...

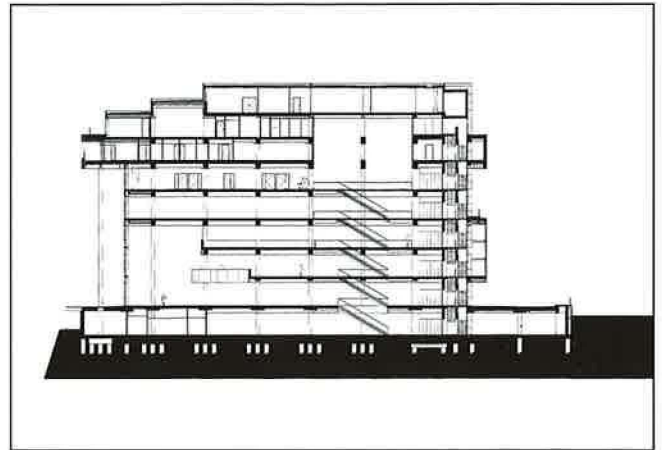
Quant à l'ossature, toute décision à prendre concerne l'ensemble du bâtiment: système porteur, circulation principale, canalisations principales, position de la façade, ... Le concept d'ossature englobe donc beaucoup plus d'éléments que ceux qui sont 'porteurs' au sens constructif du terme.

Le droit de décider et la durée de vie sont par conséquent de meilleurs critères pour discerner ossature et éléments de remplissage.

La distinction entre ossature et éléments de remplissage constitue une démarche fondamentale de la construction durable. Ce concept offre d'autre part de nombreux avantages lorsqu'on envisage une construction rationnelle et la préfabrication.

En choisissant une ossature plus neutre (la variation se reporte sur les éléments de remplissage qui dans le futur seront régulièrement modifiés), on en arrive ainsi à plus de simplicité de conception, de plus longues séries de production, un début de production probablement plus rapide et une planification simplifiée.

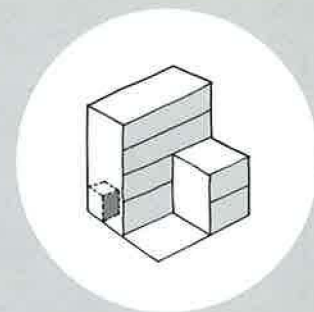
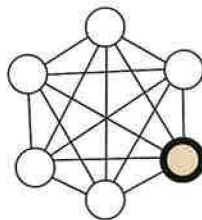
Centre Céramique (Maastricht): bâtiment multifonctionnel imbriqué dans un cadre ("l'ossature") urbain historique.



(photo Arjen Schmitz)

Le plan de masse: enveloppe et volume, contour et surface

Les systèmes de construction
Les équipements
L'ossature et les éléments de remplissage
La trame
Le canevas



La description d'un programme de construction comporte évidemment beaucoup plus que des exigences du type " Nous pensons à un nouveau complexe de bureaux de $x \text{ m}^2$ de surface..." ou " Nous désirons un entrepôt industriel de $y \text{ m}^2$ de surface...". Toutefois, la surface nette du bâtiment demeure une donnée importante.

Au début du processus de conception, il convient de prendre un certain nombre d'options principales en se posant des questions du genre : l'immeuble de bureaux comportera-t-il 2, 3, 4 étages ou plus ? La profondeur de l'aile de bureaux sera-t-elle d'environ 7, 14 ou 21 mètres ? L'entrepôt sera-t-il construit en longueur ou une disposition en carré sera-t-elle plus indiquée ?

Le maître de l'ouvrage et le concepteur n'ont pas toujours une liberté totale : des prescriptions urbanistiques, le prix du terrain, la forme du terrain,... peuvent orienter le projet dans une direction précise. Même lorsque le concepteur peut librement choisir le parti architectural, il arrive qu'il ne soit pas toujours conscient des conséquences que le plan de masse peut avoir sur les coûts.

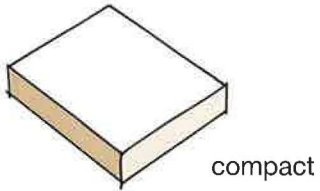
Des variantes éventuelles d'un projet peuvent différer sur beaucoup de points: efforts dus au vent, type de fondations, zones de circulation, occupation du terrain, ventilation naturelle ou forcée, possibilités d'agrandissement,... Le concepteur est bien conscient de toutes ces différences.

Les différences de prix qui découlent de la géométrie et de la morphologie sont tout aussi évidentes. C'est peut-être parce qu'elles sont si évidentes qu'elles sont parfois négligées.

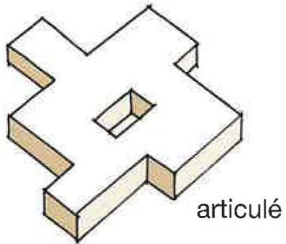
Deux paramètres jouent un rôle primordial : la forme et les dimensions. La 'méthode des éléments' permet d'évaluer l'impact des différences de formes et de dimensions sur le coût.



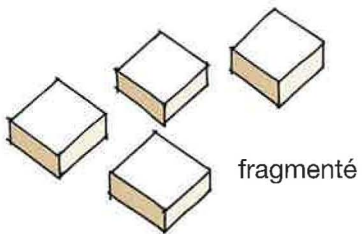
CHOIX MORPHOLOGIQUES



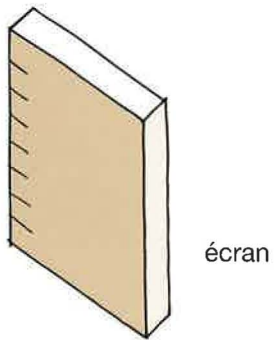
compact



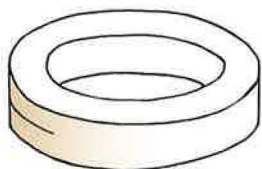
articulé



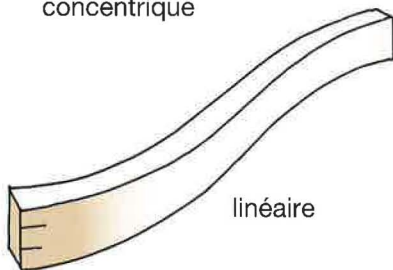
fragmenté



écran



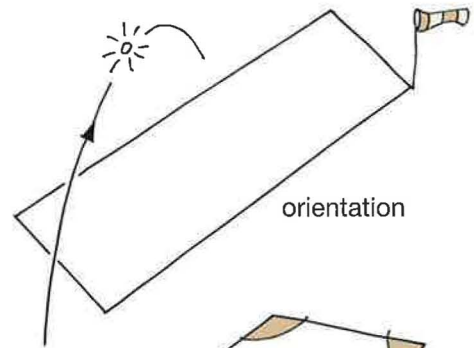
concentrique



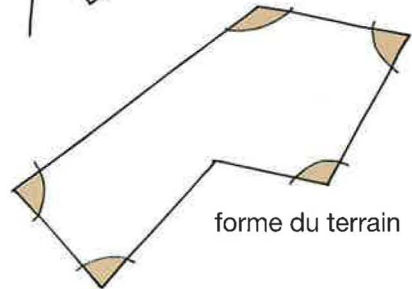
linéaire

Repère dans le paysage, délimitation d'un quartier, ensemble ouvert ou îlot fermé, tissu compact ou dispersé: le choix de la morphologie de l'ouvrage...

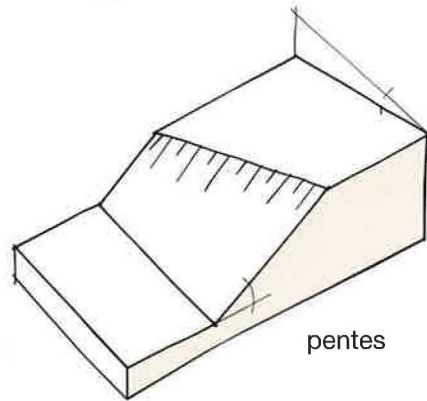
CONTRAINTES DU TERRAIN ET ABORDS



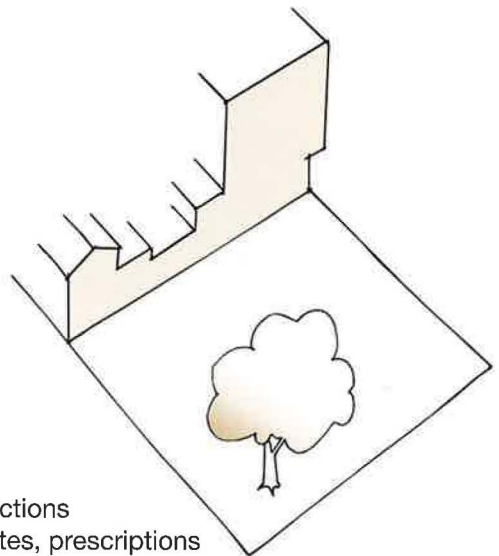
orientation



forme du terrain



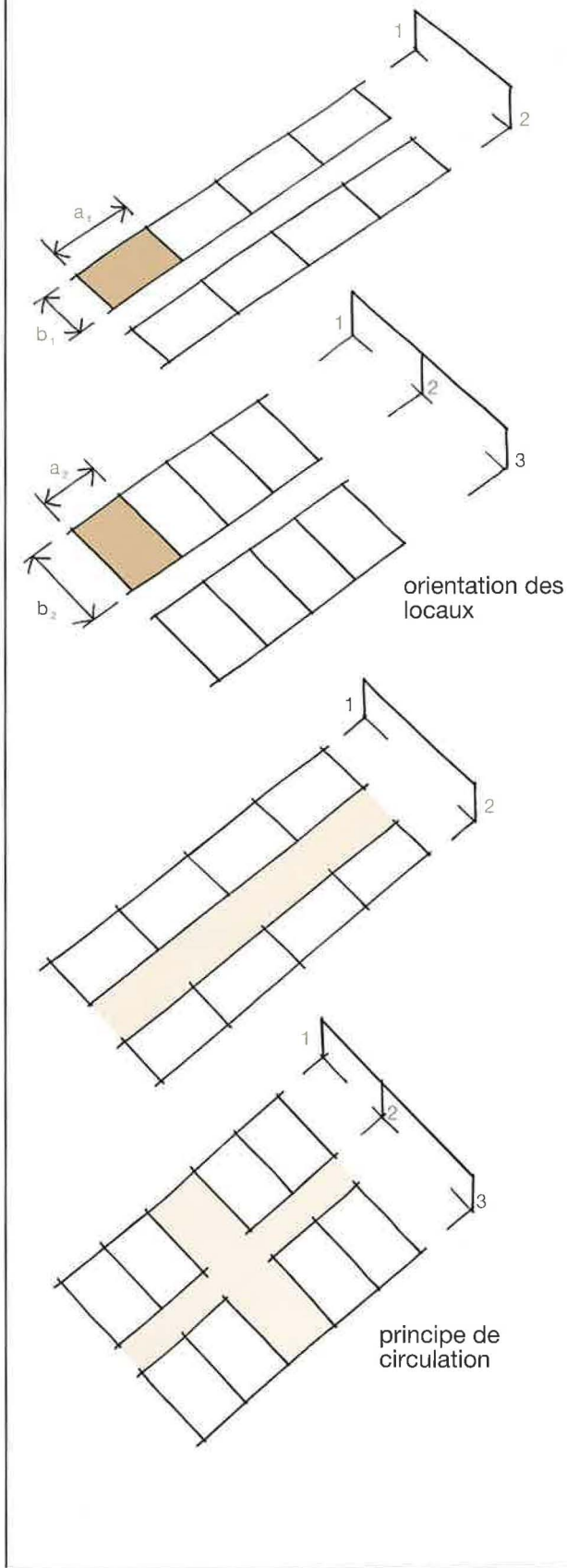
pentés



constructions
attenantes, prescriptions
urbanistiques,...

... ainsi que la forme, la pente, le sous-sol, l'orientation et les contraintes particulières du terrain (y compris les prescriptions urbanistiques) ont un impact évident sur le plan de masse.

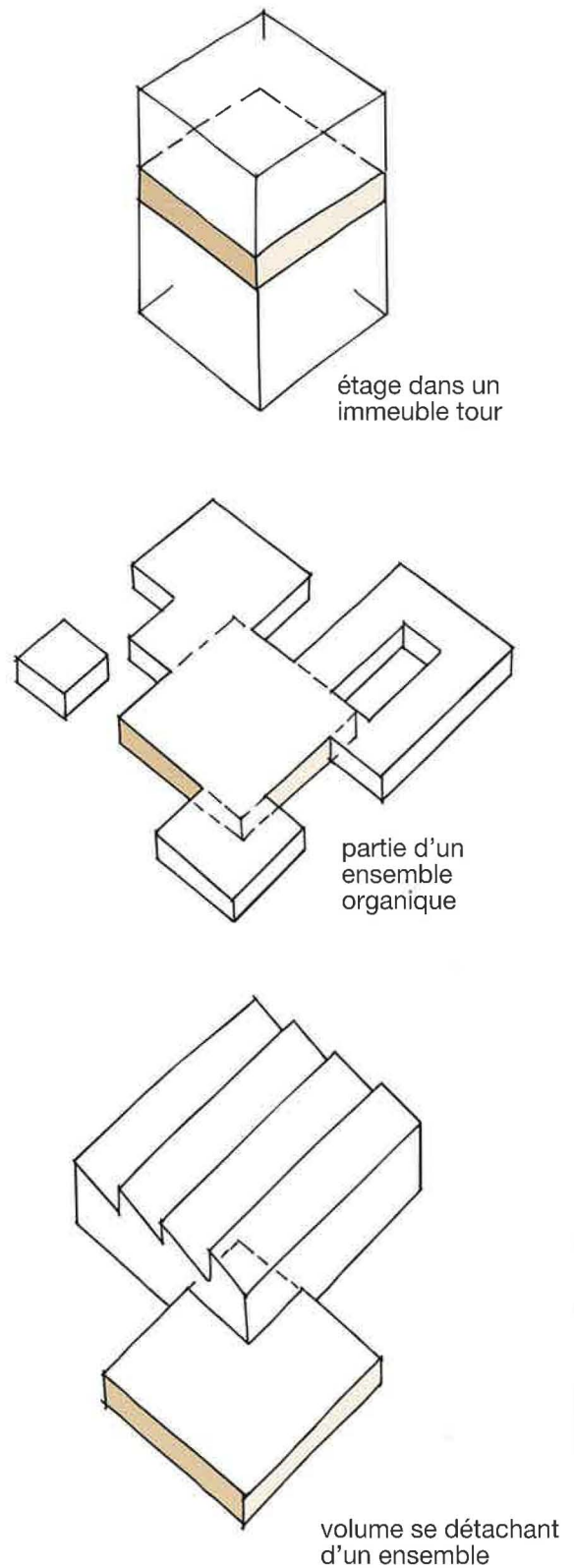
CHOIX FONCTIONNELS



Le plan de masse est également déterminé par une série de choix fonctionnels. Par exemple, la profondeur nécessaire d'un immeuble de bureaux sera différente selon qu'il s'agit d'un bureau paysager, de bureaux individuels situés le long d'un couloir, ou d'une combinaison de ces deux types.

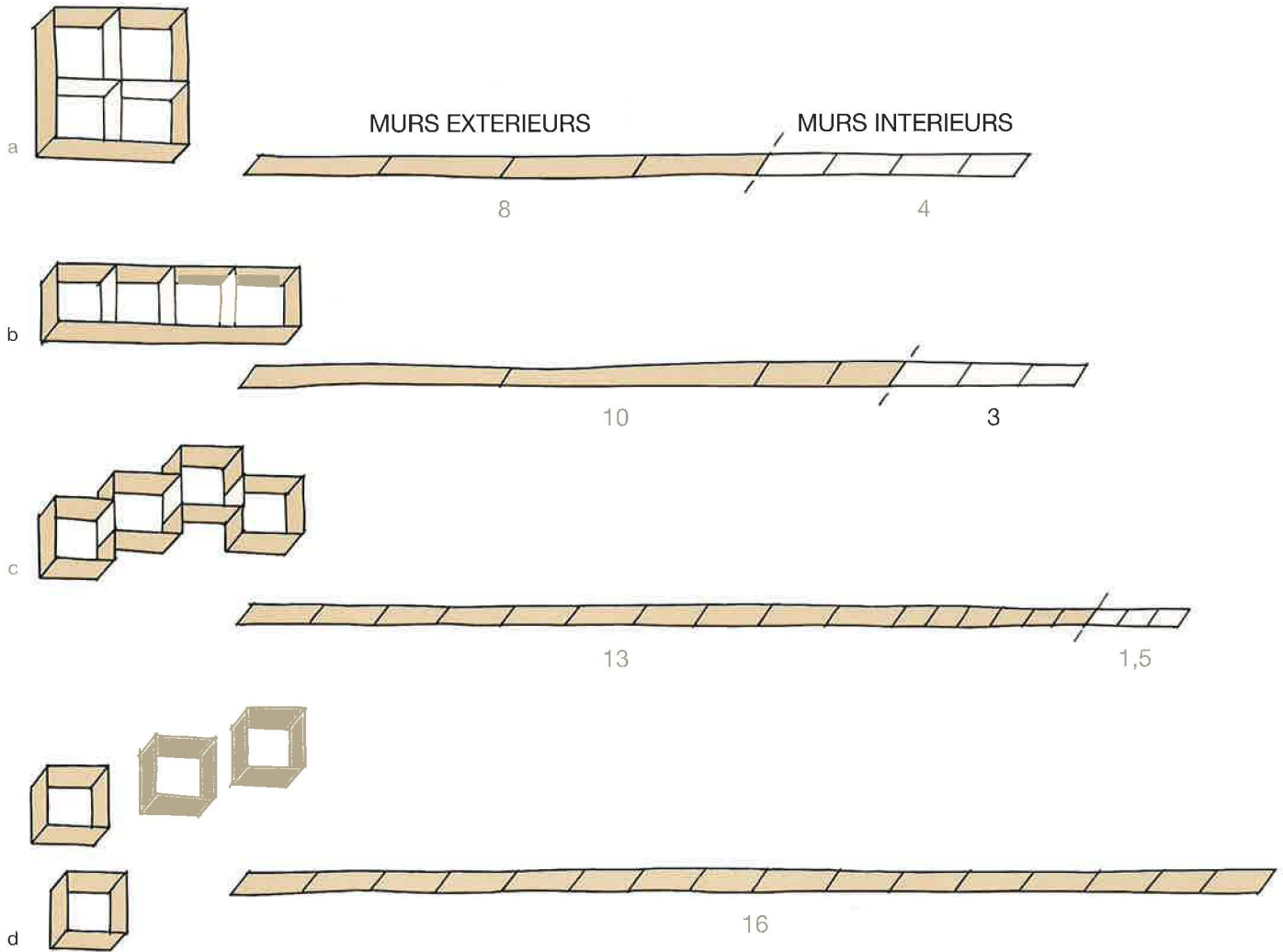
La géométrie, les dimensions et l'orientation des bureaux individuels, des espaces de circulation et des autres locaux (réunions, archives, photocopieuse, etc.) se répercutent e. a. sur le nombre de colonnes, les portées et la quantité de façades par m² de sol.

INTEGRATION

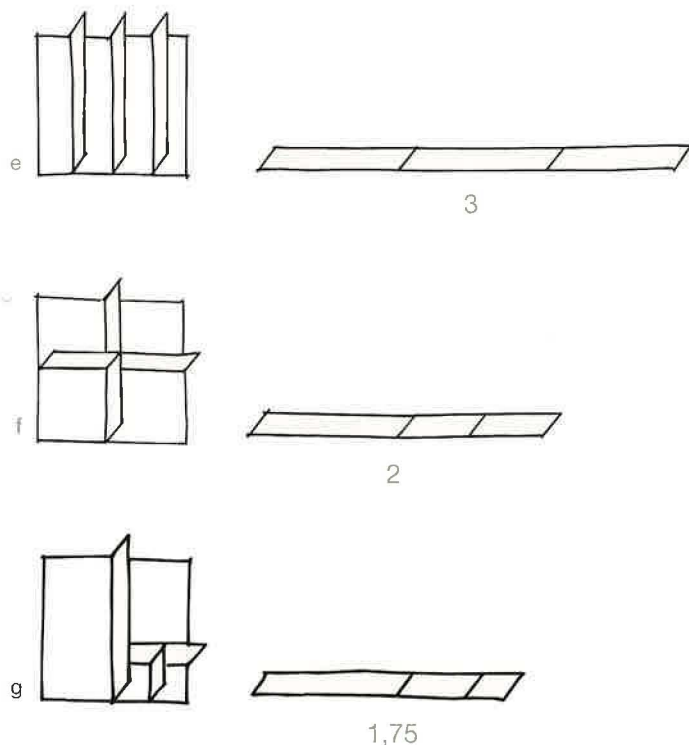


Une même surface peut être intégrée dans un ensemble plus vaste, p. ex. comme étage type dans un immeuble tour, comme partie d'une disposition plus libre ('organique'), d'un complexe industriel... Suivant le cas, les fondations, le nombre de murs extérieurs et intérieurs, d'escaliers, etc. différeront fortement.

MÊME SURFACE TOTALE, DIFFÉRENTES QUANTITÉS DE MURS EXTÉRIEURS ET INTÉRIEURS,
4 LOCAUX A SURFACE ET FORME ÉGALES :



MÊME SURFACE TOTALE, DIFFÉRENTES QUANTITÉS DE MURS INTÉRIEURS,
4 LOCAUX A SURFACE MOYENNE ÉGALE

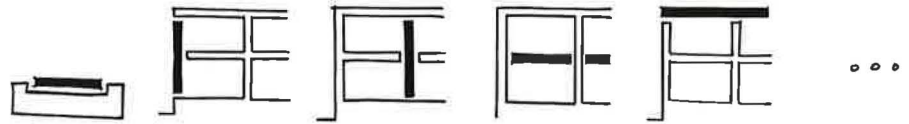


L'impact de la forme et des dimensions peut être illustré à l'aide d'une série de plans simplifiés.

Pour une même surface donnée, un plan carré (a) requiert 20 % en moins de murs extérieurs qu'un plan rectangulaire (proportion largeur/longueur = 1/4) (b), et 50 % en moins que lorsque la surface est subdivisée en 4 petits bâtiments séparés (d). Si la surface donnée est subdivisée en 4 carrés égaux, l'augmentation de la surface des façades est cependant partiellement compensée par la diminution de la surface des murs intérieurs.

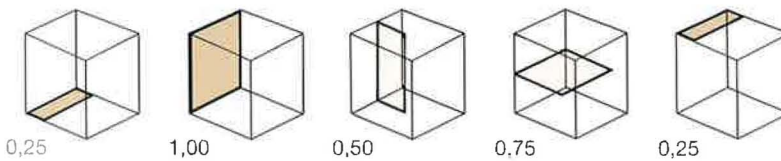
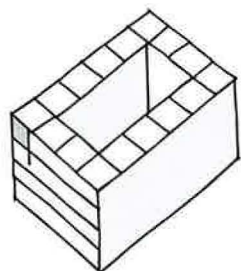
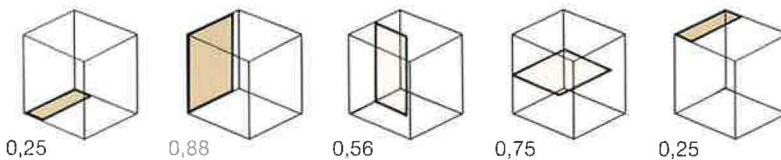
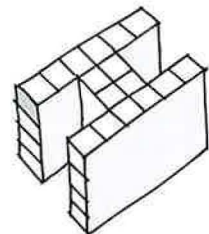
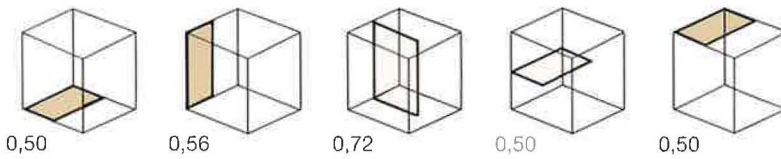
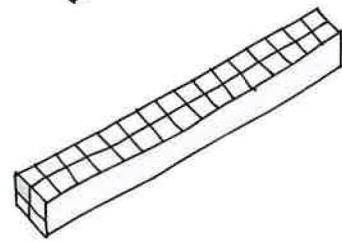
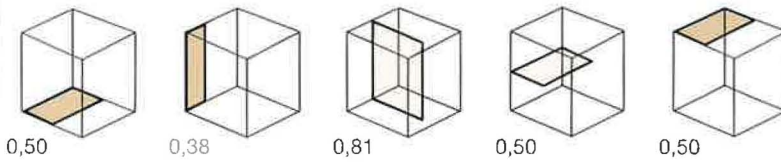
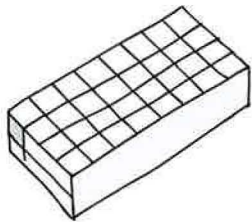
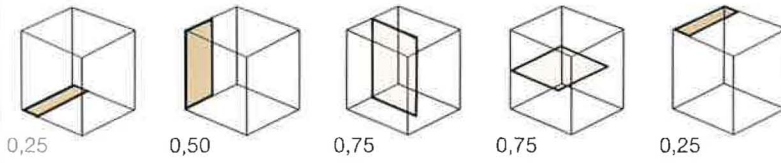
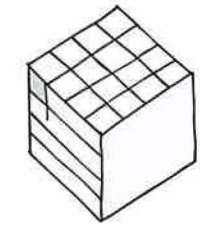
Les figures e, f et g montrent un carré subdivisé de 3 manières différentes. La quantité de murs intérieurs requise n'est pas seulement déterminée par le nombre de pièces (4 dans l'exemple). La proportion largeur/longueur de ces pièces, ainsi que la répartition entre petits et grands espaces jouent également un rôle.

ELEMENTS



PLANS DE MASSE

VISUALISATION DES RATIOS POUR 1 m³ DE VOLUME
(m² d'élément/m² de surface)



...

Analyse de l'effet des formes et des dimensions des plans de masse. Le tableau compare 5 'bâtiments' avec un différent plan de masse, mais tous composés de 64 'unités de volume'. Dans l'exemple, les proportions de cette unité de volume sont de 7,2 x 7,2 x 3,6 m³. Pour chaque plan de masse, les ratios des planchers sur sol, des murs extérieurs et intérieurs, des planchers et des toitures ont été calculés (ratio = nombre de m² de plancher, de mur, etc. par m² de surface utile). Les effets de la géométrie du bâtiment sur ses 'éléments' apparaissent ainsi de façon quantifiée.

La méthode des éléments

La méthode des éléments a été mise au point en Grande-Bretagne et s'est propagée ensuite dans plusieurs autres pays. Sur le continent européen, les Pays-Bas ont joué un rôle pionnier. Bien que les concepts de base soient les mêmes, il existe de nombreuses différences dans la manière concrète de les présenter.

Deux objectifs principaux sont à la base de la méthode :

- la méthode, à laquelle on peut recourir dès la première phase du processus de conception, doit permettre d'établir des estimations des coûts de plus en plus précises;
- la méthode doit non seulement permettre de faire des estimations, mais également constituer un instrument qui rend possible des corrections en cas de dépassement de budget. Ce n'est donc pas uniquement une technique d'estimation, mais c'est également une technique de maîtrise des coûts.

Le principe fondamental est de subdiviser un bâtiment en parties. Nous appellerons 'éléments' ces diverses parties. La notion d'élément évolue au cours du processus. Au début du processus de conception, les parties sont grandes et définies sommairement. A la fin du processus, le concept de partie correspond à des détails bien précis.

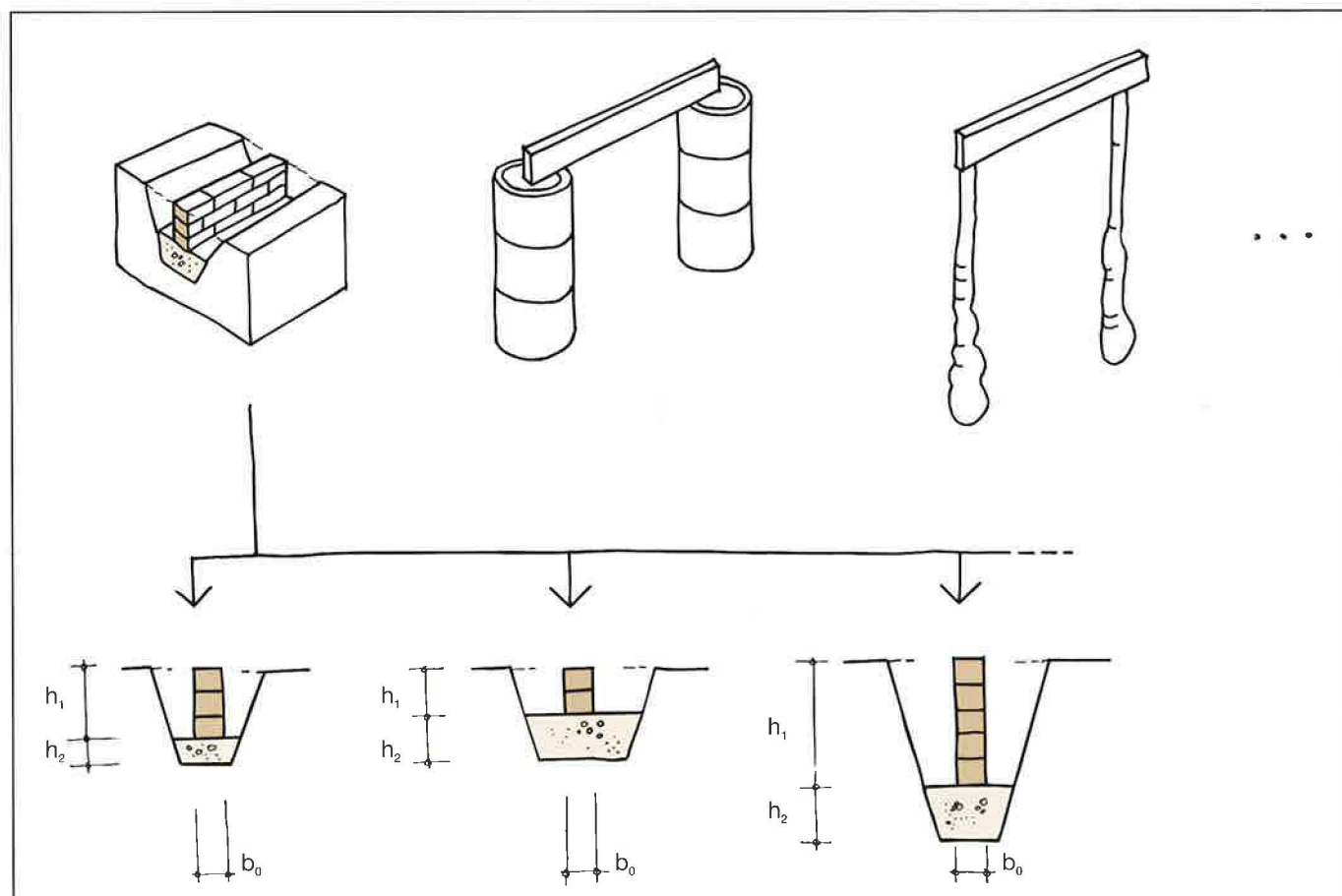
Les éléments sont définis de telle manière que des changements qui sont apportés influencent le moins possible d'autres éléments. Une semelle de fondation, par exemple, peut être remplacée par une poutre de fondation qui repose sur des faux-puits ou sur des pieux.

Le traitement des données dans la méthode des éléments est réalisé à l'aide d'un tableau qui résume les données des variantes analysées. Dans le cas d'un nouveau projet, le concepteur rédige un nouveau tableau ou utilise un tableau d'un projet qui se rapproche le plus possible de ce nouveau projet.

Le principe d'un tel tableau est illustré ci-contre. Celui-ci contient une ligne par élément. Chaque ligne reprend les données suivantes :

- la description de l'élément (nom, code BB/SfB, ...);
- le prix unitaire de l'élément. L'unité varie d'un élément à l'autre. Par exemple :
 - murs: prix par mètre carré;
 - semelle: prix par mètre courant;
 - toiture: prix par mètre carré de projection horizontale;
 - escalier : prix par pièce;
- le *ratio* de chaque élément (rapport entre le nombre d'unités de l'élément et la surface totale utile);
- le prix de l'élément par mètre carré de surface utile (produit des deux nombres précédents) ;
- les frais totaux par élément (prix par mètre carré de surface au sol multiplié par la surface totale utile).

Exemples d'éléments définis comme entités modulaires.



Surface totale utile = S						
Code BB/SFB	Élément	Prix unitaire	Unité	Ratio (unités/m ² de surface)	Prix par m ² de surface	Prix total par élément
(13)	plancher sur sol	p1	m ²	r1	p1 x r1	p1 x r1 x S
(16)	fondation sur semelle	p2	m ¹	r2
(21)++	mur extérieur (y compris ouvertures)	p3	m ²	r3		
(22)++	mur intérieur (y compris ouvertures)	...	m ²	...		
(23)++	plancher		m ²			
(24)++	escalier		pièce			
(27)++	toiture		...			
(5-)/(8-)	installations techniques /équipements				pi	pi x S
	...					
(9-)	travaux et éléments extérieurs					p _n
TOTAL					SOMME / S	SOMME

La 'méthode des éléments': principe du tableau de traitement des données.

Dans le cas de certains éléments, il est compliqué, voire impossible, de calculer un ratio : c'est le cas, par exemple, de l'éclairage ou du chauffage. On applique alors un prix par mètre carré de sol. Ce prix est inscrit dans la colonne appropriée et peut également être multiplié par la surface totale, afin de connaître le prix total de l'élément.

Dans le cas d'autres éléments, ni un ratio, ni un prix par mètre carré de sol n'ont de sens : c'est le cas, par exemple, des frais de raccordement à l'égout public. Dans ce cas, le prix total de l'élément est directement inscrit dans la dernière colonne. La somme de tous les prix des éléments détermine le coût du projet.

Si on divise ce prix total par la superficie totale, on obtient le prix par mètre carré de surface utile. La méthode des éléments permet de distinguer entre les frais qui concernent la géométrie et ceux qui sont conditionnés par les solutions techniques pour les éléments. La géométrie influence le ratio. Les choix techniques déterminent le prix unitaire. L'ensemble des deux détermine, pour l'élément considéré, les dépenses par mètre carré de surface.

Notons également que, pour déterminer ce prix unitaire, on peut regarder uniquement les frais de construction, ou inclure la somme des valeurs actuelles et des frais d'utilisation (entretien, remplacements, pertes thermiques,...).

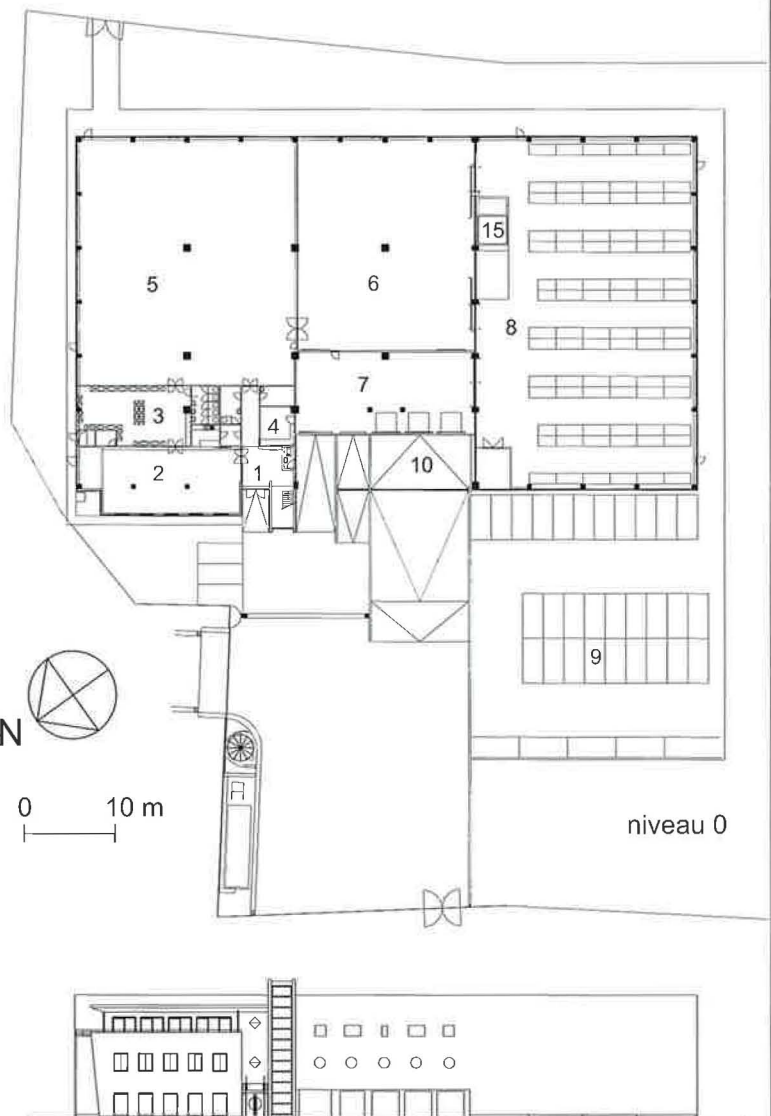
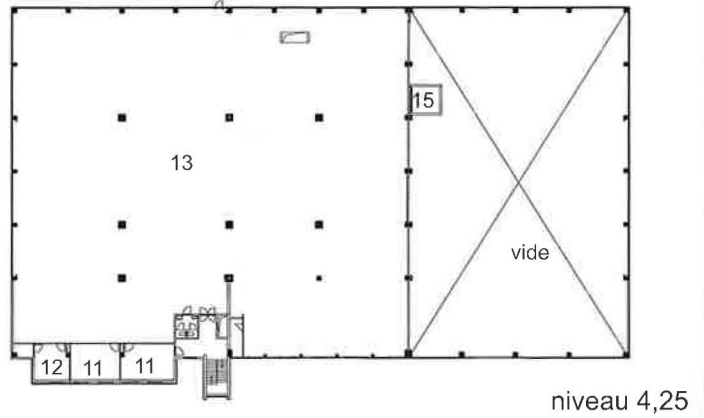
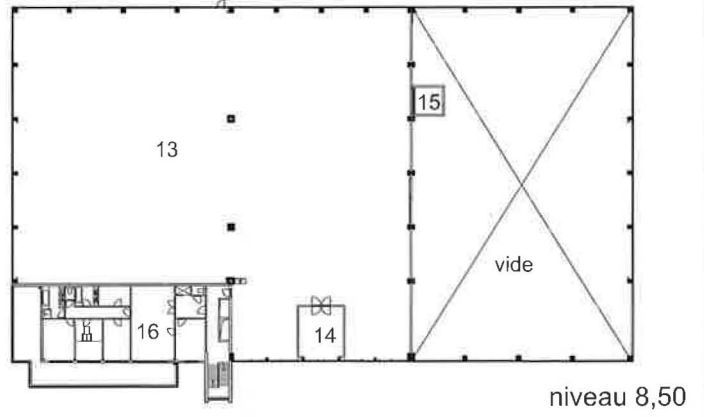
Exemple d'un plan de masse compact intégrant diverses fonctions.



(photo : L.P. Van der veken)



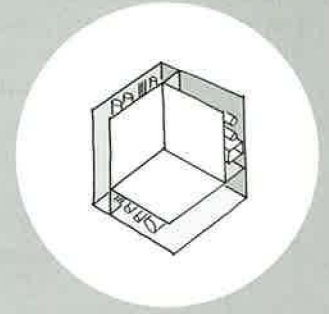
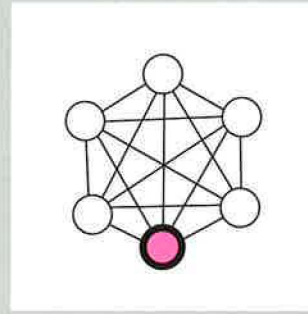
(photo : T. Grobet)



- 1 - entrée
- 2 - réfectoire
- 3 - vestiaire
- 4 - réception
- 5 - contrôle produits finis
- 6 - expédition
- 7 - chargement/déchargement
- 8 - stockage carton
- 9 - parking (espace d'extension)
- 10 - quai
- 11 - bureaux
- 12 - salle informatique
- 13 - stockage produits finis
- 14 - chaufferie
- 15 - ascenseur
- 16 - conciergerie

Les équipements: une structure sous-estimée

L'ossature et les éléments de remplissage
La trame
Le canevas
Le plan de masse
Les systèmes de construction



Chaque concepteur sait que, lors de l'élaboration de l'esquisse, il doit garder à l'esprit les options principales qui concernent la stabilité du bâtiment: sens de portée, positions des poutres maîtresses et des colonnes, emplacements des éléments raidisseurs tenant compte des effets du vent,...

Les équipements doivent également être étudiés dès l'esquisse. Ils prennent de plus en plus d'importance en intervenant, entre autres, dans le prix de revient. Les éléments principaux du réseau d'installation appartiennent à l'ossature, dans le sens que lui a conféré Habraken: les décisions concernant l'ossature prévalent par rapport au droit de décision de l'utilisateur individuel (par exemple, le locataire de x m² de bureaux au 4^{ème} étage). Les conduites principales font autant partie de cette 'ossature' que la structure constructive et le système de circulation principal. Elles sont donc mieux conçues si l'auteur de projet garde à l'esprit la réutilisation du bâtiment à long terme.



Les options principales concernant les installations doivent, dans la plupart des cas, être prises en relation avec les options prises pour la structure porteuse. Par exemple :

- Les principales conduites verticales sont installées dans des gaines. Souvent, les circulations verticales, telles que les cages d'escaliers et les ascenseurs, se situent également à proximité de ces points. Les gaines et les cages d'ascenseurs assurent la reprise des efforts dus au vent.
- La distribution horizontale principale s'effectue souvent dans les couloirs, qui se raccordent aux cages d'escaliers et aux ascenseurs. Les conflits entre les conduites principales et les éléments constructifs primaires doivent être résolus.
- Les embranchements importants des conduites principales ainsi que le système de planchers et de poutres doivent être conçus ensemble: les orifices dans les poutres, les dérives parallèles aux nervures d'un plancher à nervures, l'utilisation des alvéoles dans les éléments de plancher,...

Les canaux de ventilation et les conduites d'évacuation des matières fécales posent des problèmes lors de la conception d'un réseau de canalisations. Les premiers à cause de leurs grandes sections, les secondes à cause de leurs sections non négligeables et le fait que leur tracé doit respecter une pente. Dans le cas de l'évacuation des matières fécales, on peut souvent limiter les problèmes en groupant les espaces sanitaires autour de gaines verticales. Ce n'est cependant pas toujours possible: il arrive que l'on désire répartir les toilettes comme dans le cas des hôpitaux, maisons de repos et de soins,...

Dans le cas des gaines de ventilation, la question de base est de savoir si elles sont vraiment nécessaires. L'évacuation naturelle de l'air suffit peut-être et l'amenée d'air frais peut se faire par des ouvertures contrôlables dans la façade. La profondeur totale du bâtiment, un choix important dans chaque projet, joue ici un rôle non négligeable.

Si l'amenée d'air doit s'effectuer par des conduites d'alimentation, une question primordiale se pose: faut-il seulement faire entrer de l'air chaud ou faut-il aussi prévoir de refroidir cet air? Le refroidissement est surtout influencé par les exigences fonctionnelles du programme, telles que la présence d'ordinateurs, de machines spécifiques, de lumière artificielle, ... et par la chaleur provoquée par le soleil.

L'apport de chaleur grâce à l'ensoleillement dépend de l'orientation du bâtiment et de la conception de la façade. Des pare-soleil fixes, par exemple, protègent du soleil en été, mais ne doivent pas empêcher les gains de chaleur en hiver. Si le soleil pénètre, il est éventuellement possible de stocker la chaleur dans un matériau à capacité thermique et de libérer ensuite cette chaleur quand le bâtiment tend à se refroidir. Cette capacité thermique doit toutefois être assez grande et suffisamment accessible: la capacité thermique des éléments de plancher ne pourra pas être mobilisée dans le cas d'un plancher surélevé (destiné au câblage du réseau informatique, par exemple) ou d'un faux plafond. Puisque les rayons directs du soleil tombent sur le sol, un faux plancher aura des effets thermiques plus grands qu'un faux plafond. Par contre, un plafond apparent permet de profiter de la finition soignée qui est possible lors de la préfabrication.

Le principe de ce tampon thermique semble prometteur, mais doit certainement être analysé en profondeur. Il est d'ailleurs toujours moins important que les effets de réchauffement provoqués par les rayons directs du soleil. L'étude du comportement thermique d'un bâtiment est donc liée aux options relatives à sa structure.

Le besoin de lumière artificielle est également un élément important de l'équilibre thermique. La profondeur et la forme du bâtiment, l'emplacement et les dimensions des fenêtres jouent un rôle essentiel. Les fenêtres hautes laissent pénétrer la lumière plus loin. L'orientation au nord laisse passer la lumière, mais exclut l'ensoleillement direct.

Un faux plancher et un faux plafond jouent éventuellement un rôle dans le comportement thermique du bâtiment; ils créent également beaucoup de flexibilité lors de l'étude de nombreux dispositifs techniques, tels que l'éclairage, l'électricité, la téléphonie, la télématique,...

Il faut chaque fois se demander si un faux plafond et un faux plancher sont nécessaires simultanément. La construction d'un faux plafond est certainement beaucoup plus légère que celle d'un faux plancher, car il n'est pas nécessaire de circuler sur le plafond.

Des dérives de conduites descendant du faux plafond peuvent se révéler gênantes. Les raccordements des parois de séparation au faux plafond et au faux plancher exigent une attention particulière, spécialement dans le cas de l'isolation acoustique et du passage de conduites.

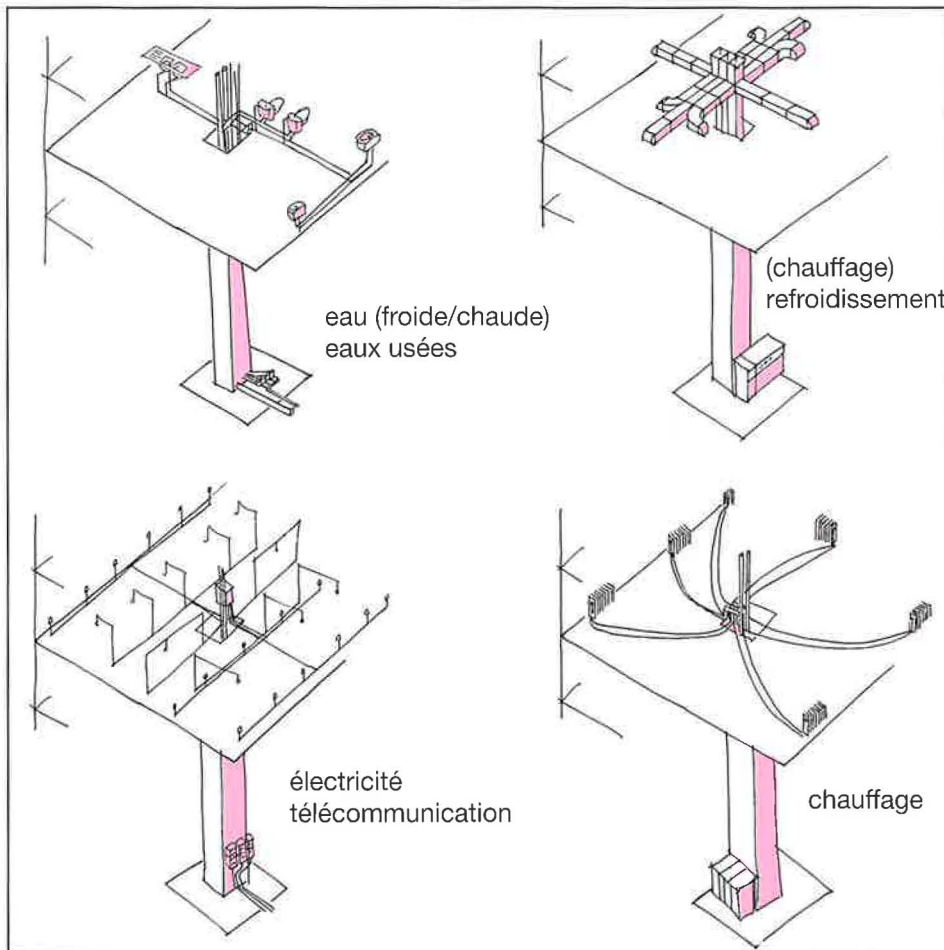
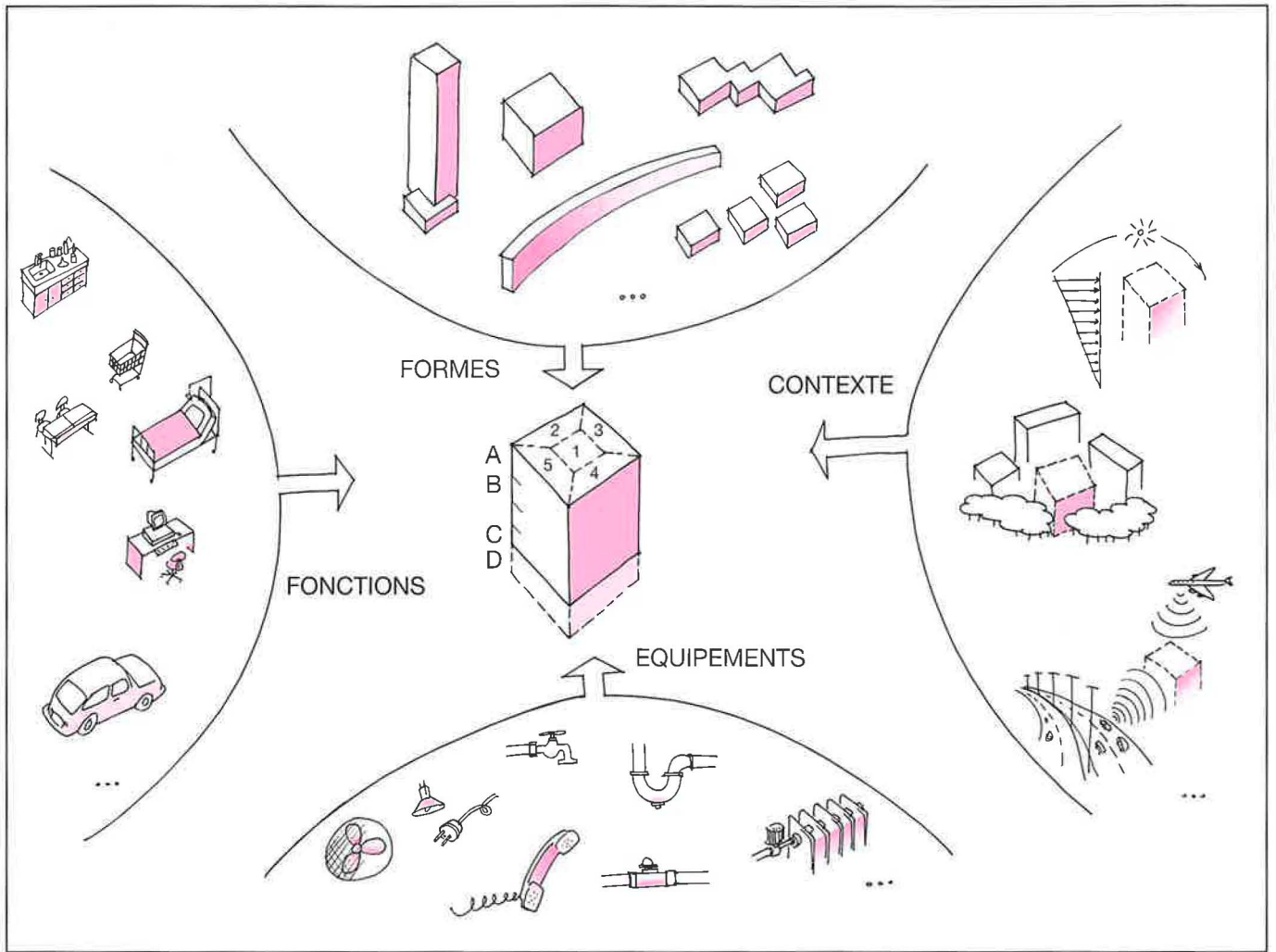
Les systèmes de distribution classiques sont les suivants:

- Des conduites passent autour du bâtiment dans une zone de garde-corps sous les fenêtres.
- Des conduites passent au-dessus d'un couloir central. A partir de là, des embranchements partent vers les locaux situés le long des façades. Si nécessaire, la hauteur de plafond du couloir peut être abaissée afin de laisser plus d'espace aux canalisations.
- Une combinaison des deux systèmes précédents est également possible.

Dans certains projets, une solution radicale est choisie. Elle consiste à n'installer ni faux plancher, ni faux plafond, mais de laisser les conduites apparentes. A condition d'y appliquer une finition soignée, cette approche peut donner lieu à une architecture fort expressive. Par contre, s'il y a trop de surfaces dures, les performances acoustiques risquent d'être médiocres.

Dans le cas d'un immeuble de bureaux cellulaires, il existe des systèmes de pose apparente. Les conduites sont alors posées sur les murs, à hauteur des plinthes ou du plan de travail. L'alimentation peut avoir lieu à partir de la façade ou du couloir.

Il ressort de toutes ces considérations que le concept des installations doit être étudié dès l'ébauche du projet. Il est en rapport avec l'orientation du bâtiment, la conception de la façade vitrée et du pare-soleil, la profondeur du bâtiment, le niveau de confort, la structure portante, la circulation dans le bâtiment...



Dans un bâtiment, différentes zones peuvent être distinguées, tant dans le sens vertical (p. ex. :)

A - étage supérieur

B - étage type

C - rez-de-chaussée

D - sous-sol

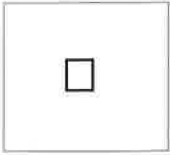
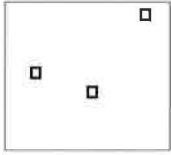
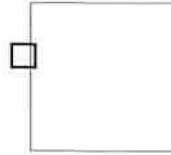
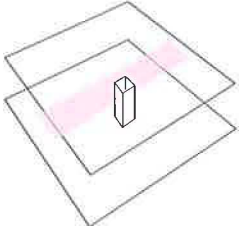
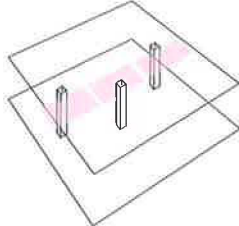
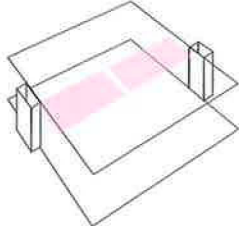
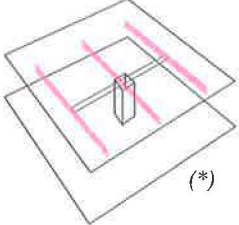
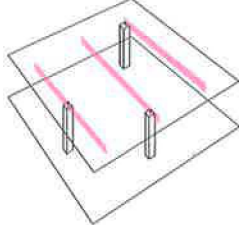
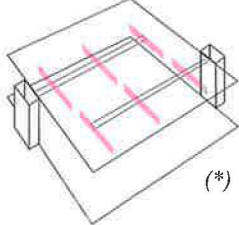
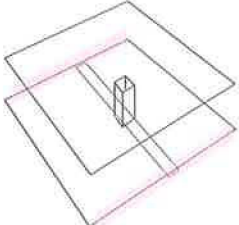
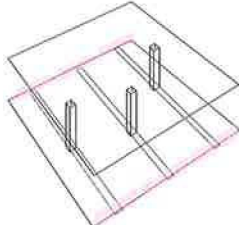
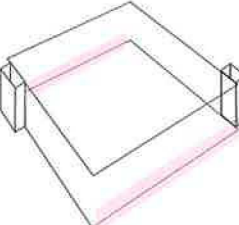
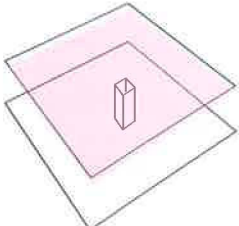
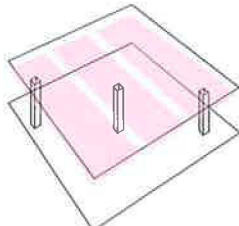
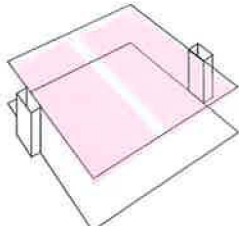
que dans le sens horizontal (p. ex. :)

1 - zone centrale

2, 3, 4, 5 - zones périphériques.

Les contraintes de confort (visuel, thermique, acoustique) et par conséquent les performances exigées des équipements ne sont pas nécessairement les mêmes pour chaque zone.

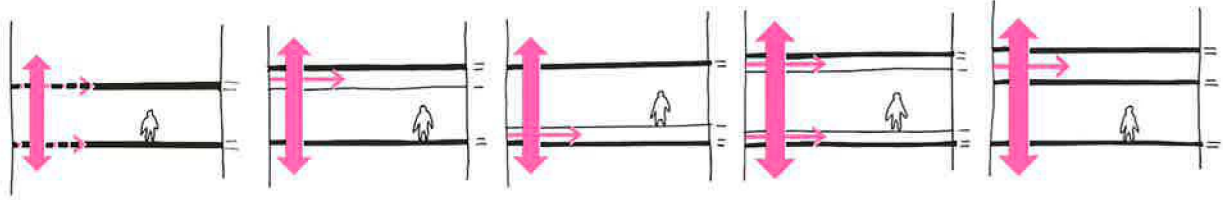
Conduites verticales et distribution horizontale : principe d'arborescence appliqué à diverses familles d'équipements.

<p>EMPLACEMENT DES CONDUITES VERTICALES:</p> <p>DISTRIBUTION HORIZONTALE :</p>			
<p>au-dessus de la zone de circulation</p> <p>le long des éléments de structure</p> <p>le long de la façade</p> <p>couche entière (faux plancher et/ou faux plafond)</p>	 <p>centralisé / concentré</p>	 <p>dispersé</p>	 <p>périphérique / concentré</p>
			
	 <p>(*)</p>	 <p>(*)</p>	 <p>(*)</p>
			
			

Principales conduites verticales et distributions horizontales:
Aperçu des possibilités de combinaison, variantes d'arborescences.

(*) Risque de conflit entre conduites et éléments constructifs.

EMPLACEMENT DES CANALISATIONS HORIZONTALES (PRINCIPE)



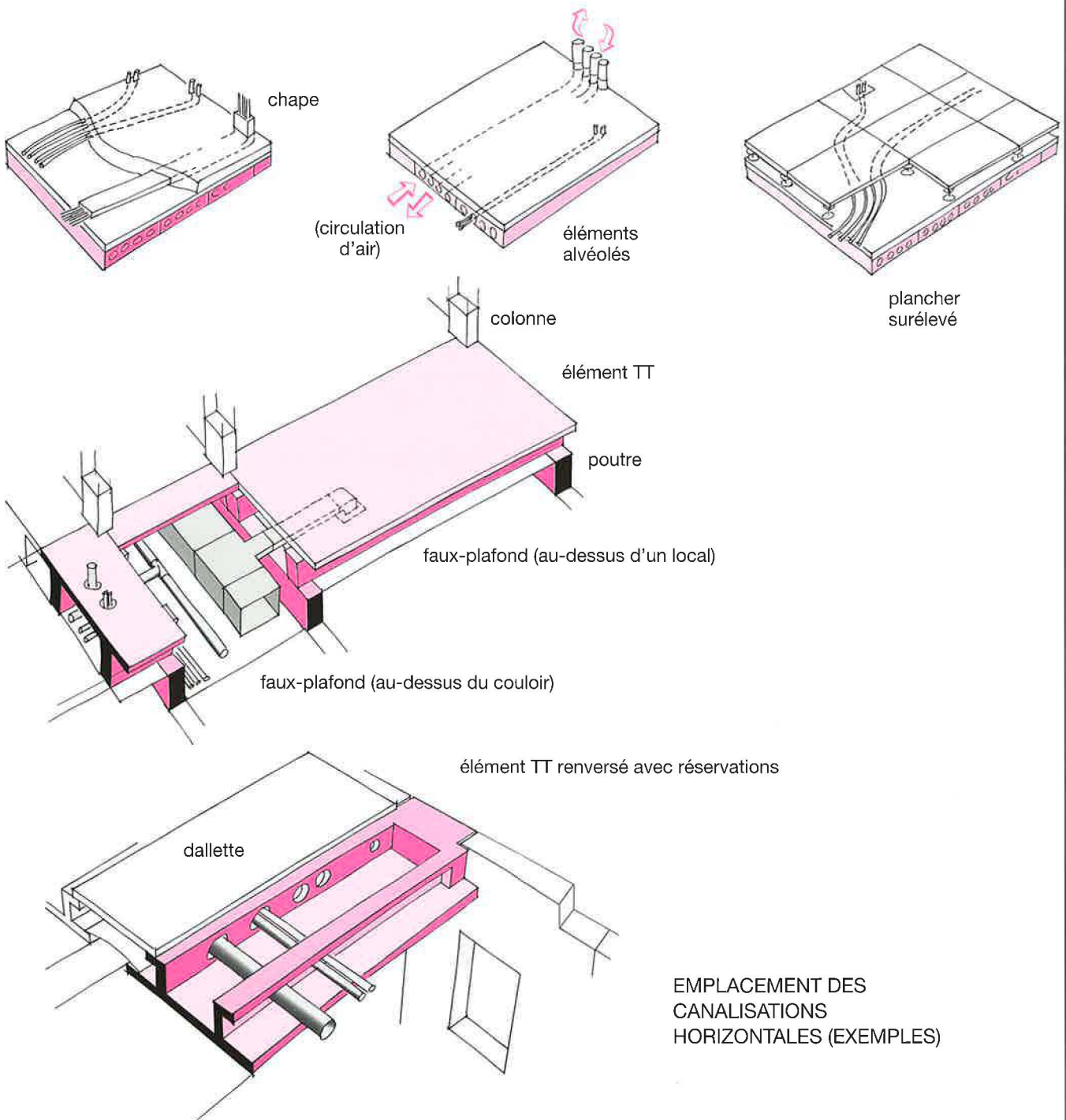
encastrées dans les planchers

dans faux-plafond

dans plancher surélevé

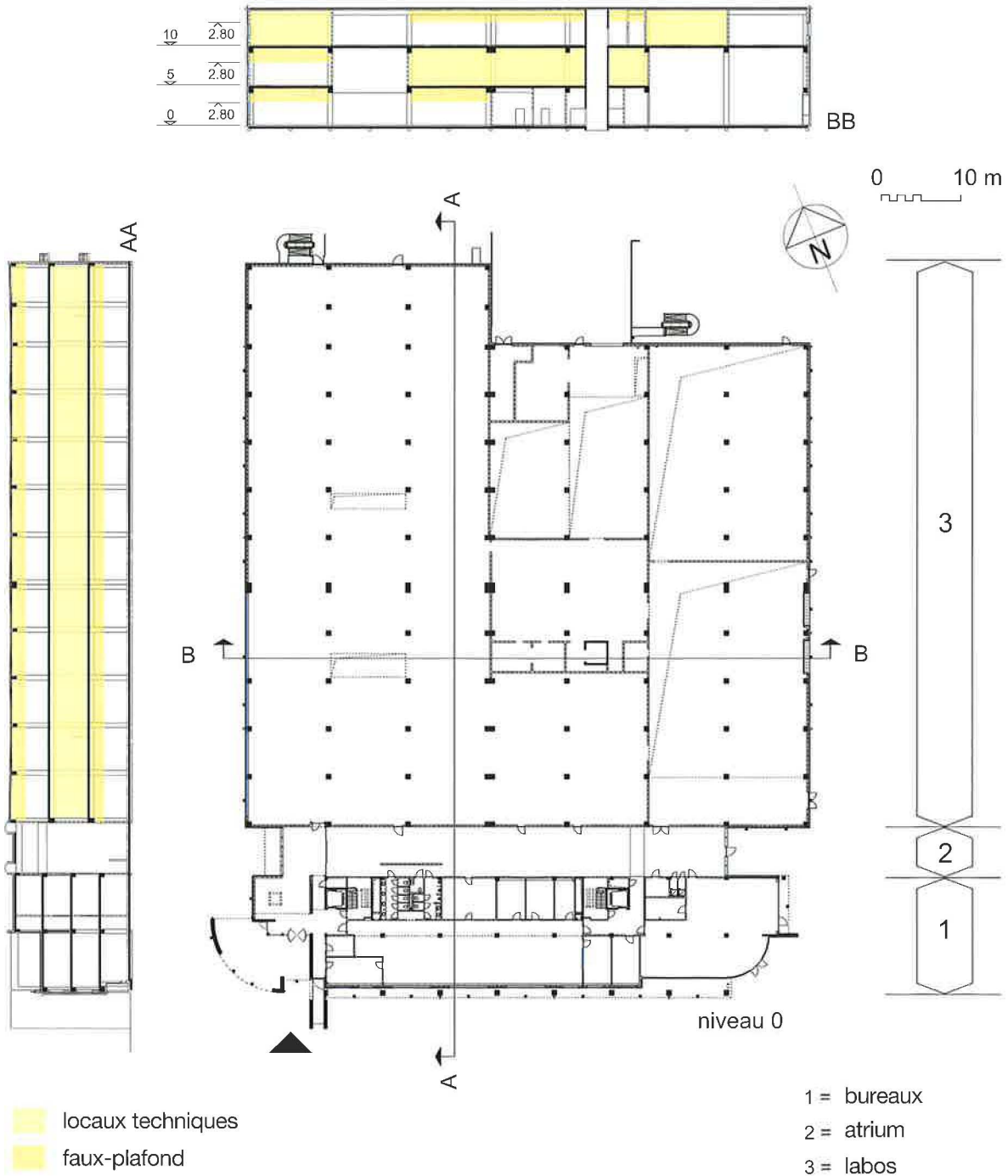
dans faux-plafond et plancher surélevé

dans étage intermédiaire



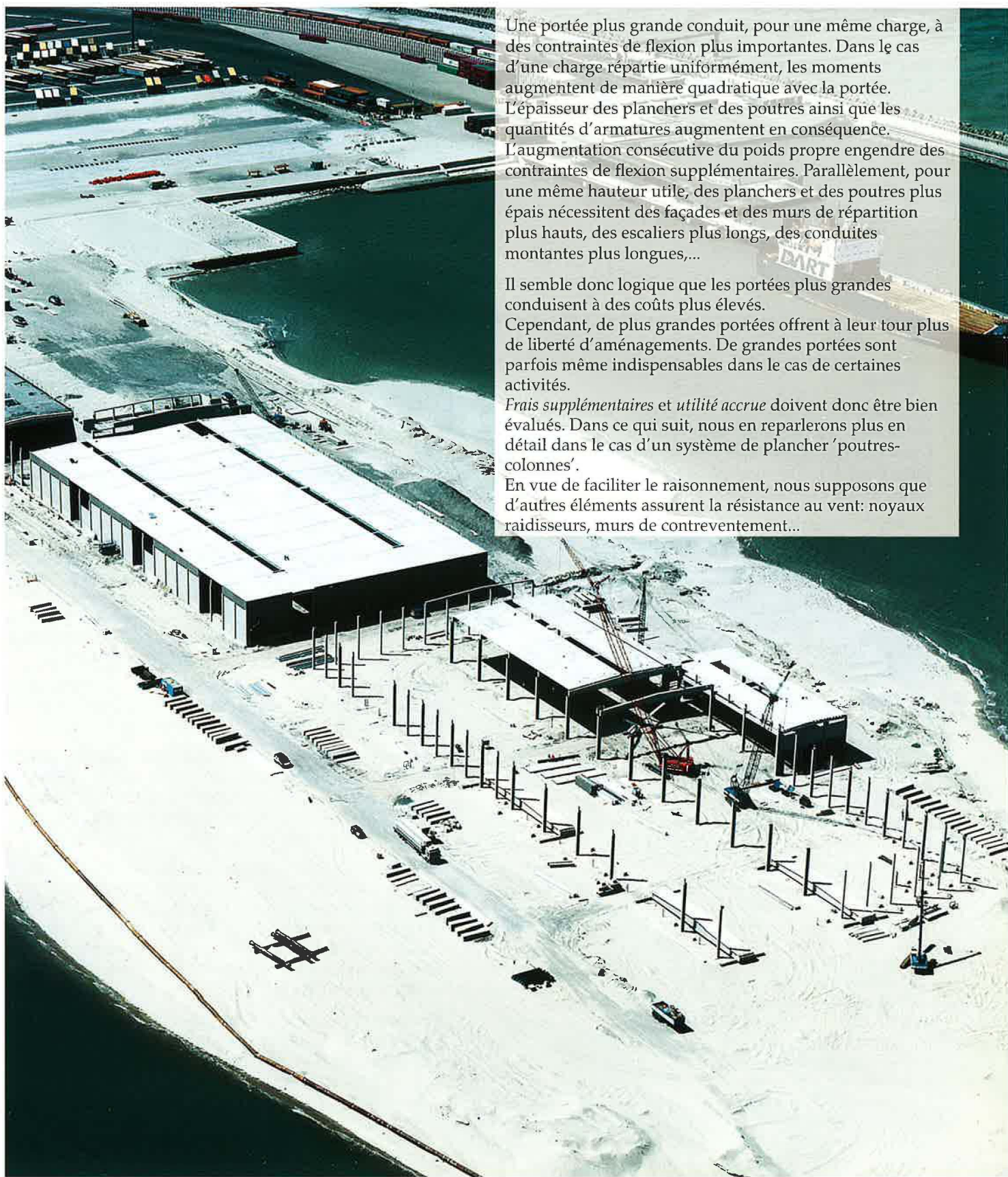
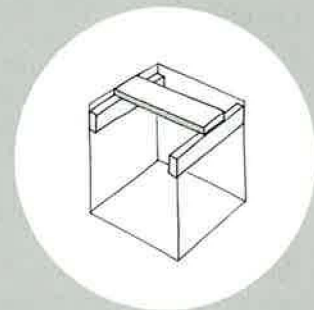
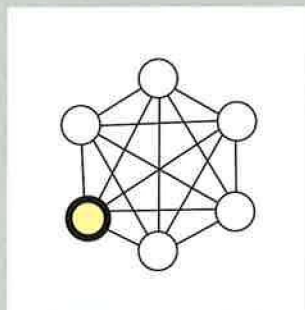
EMPLACEMENT DES
CANALISATIONS
HORIZONTALES (EXEMPLES)

Innogenetics, Zwijnaarde - arch. Storme & Van Ranst



Le canevas: portée et adaptabilité

Le plan de masse
Les systèmes de construction
Les équipements
L'ossature et les éléments de remplissage
La trame



Une portée plus grande conduit, pour une même charge, à des contraintes de flexion plus importantes. Dans le cas d'une charge répartie uniformément, les moments augmentent de manière quadratique avec la portée. L'épaisseur des planchers et des poutres ainsi que les quantités d'armatures augmentent en conséquence. L'augmentation consécutive du poids propre engendre des contraintes de flexion supplémentaires. Parallèlement, pour une même hauteur utile, des planchers et des poutres plus épais nécessitent des façades et des murs de répartition plus hauts, des escaliers plus longs, des conduites montantes plus longues,...

Il semble donc logique que les portées plus grandes conduisent à des coûts plus élevés. Cependant, de plus grandes portées offrent à leur tour plus de liberté d'aménagements. De grandes portées sont parfois même indispensables dans le cas de certaines activités.

Frais supplémentaires et utilité accrue doivent donc être bien évalués. Dans ce qui suit, nous en reparlerons plus en détail dans le cas d'un système de plancher 'poutres-colonnes'.

En vue de faciliter le raisonnement, nous supposons que d'autres éléments assurent la résistance au vent: noyaux raidisseurs, murs de contreventement...

Les planchers

Supposons qu'un plancher doit supporter une certaine charge utile par mètre carré (q en kN/m^2). Ce plancher, d'une section donnée, est caractérisé par un certain poids propre (g en kN/m^2). D'après l'Eurocode 2, il convient d'appliquer les coefficients partiels de sécurité 1,5 et 1,35 - respectivement à la charge utile q et au poids propre g .

Dans le cas d'un élément reposant sur deux d'appuis articulés, le moment maximum est atteint à mi-portée et est exprimé par :

$$M_{\max} = \frac{(1,35 g + 1,5 q) l^2}{8}$$

où l est la portée de l'élément.

Pour chaque type d'élément dont la forme, les dimensions, le type de béton et les armatures sont fixés, le moment maximum de calcul (M^*_{\max}) peut être ainsi déterminé. Pour un élément de plancher donné, le rapport entre la charge utile et la portée peut être représenté par une courbe (fig. a):

$$q = \frac{8 M^*_{\max}}{1,5 l^2} - \frac{1,35}{1,5} g$$

Une telle courbe peut être utilisée de deux façons pour déterminer :

- la portée maximale possible en fonction d'une charge utile connue;
- la charge utile maximale correspondant à une portée connue.

Une telle courbe peut être établie pour toute une série d'éléments qui diffèrent entre eux par l'épaisseur et l'armature (fig. b). Une épaisseur de plancher plus grande correspond à un moment résistant plus grand mais, en même temps, à un poids propre plus élevé.

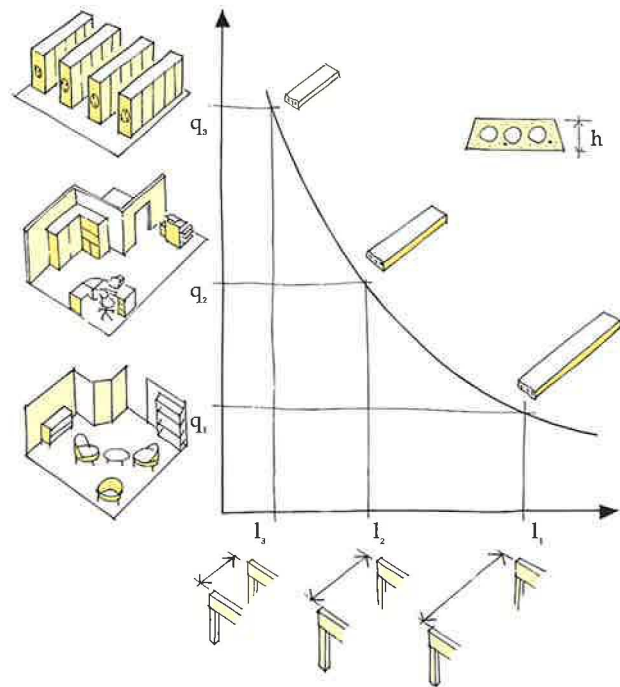
La plupart des producteurs d'éléments préfabriqués mettent à la disposition des concepteurs de telles séries de courbes définissant leurs produits. Ils proposent aussi des courbes caractérisant la déformation à mi-portée (la flèche). Une limitation de la flèche peut en effet s'avérer plus exigeante que la reprise d'un moment de calcul déterminé.

Le raisonnement théorique qui suit peut être appliqué afin de déterminer le coût d'un plancher mis en place.

Considérons des éléments d'une section donnée, mais de longueurs différentes. Certains coûts sont proportionnels à la quantité de matériaux utilisée et donc, pour la section donnée, à la longueur. Une partie des coûts est fixe par élément: ceux découlant du sciage des éléments produits par extrusion, de la manipulation lors de la production, du transport et du montage, de la mise en place de coffrages, de la logistique, ...

La relation entre les coûts totaux par élément et la longueur est représentée par une droite (fig. c):

$$\text{Prix par élément} = A + B \cdot l$$



Il en découle que le prix par mètre carré de plancher placé diminue de manière hyperbolique au fur et à mesure que la longueur l augmente (fig. d):

$$\text{Prix par } m^2 = \frac{A}{b \cdot l} + \frac{B}{b}$$

où b est la largeur du plancher

Plus le coût fixe (A) par élément est élevé, plus la partie hyperbolique devient importante.

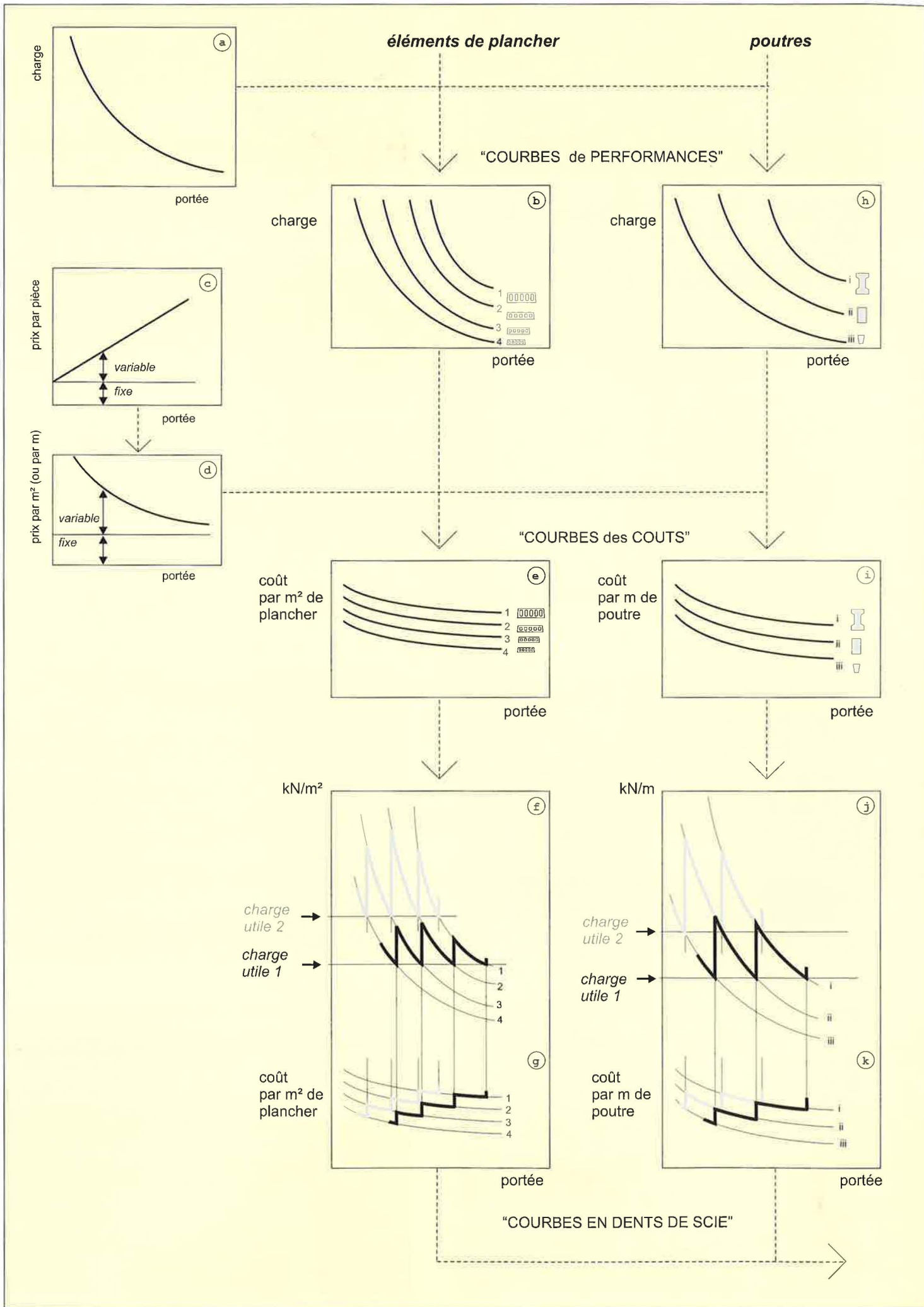
NB: Nous considérons ici le coût du transport correspondant à une distance moyenne depuis l'unité de production jusqu'au chantier et le coût de montage moyen. Le coût doit toujours être interprété avec la plus grande prudence: dans certains cas, des circonstances spécifiques lors de la production, du transport ou du montage peuvent conduire à des valeurs moyennes qui ne sont pas applicables.

Dans le cas d'une série d'éléments, le prix par élément est représenté par une série de droites et le prix par m^2 de plancher par une série d'hyperboles (fig. e).

Cette courbe des coûts peut ensuite être combinée avec la courbe des charges utiles: pour une charge utile q à reprendre, la figure indique, pour des portées (l) croissantes, quand il faut passer à un profil offrant plus de résistance (courbe 'en dents de scie', fig. f).

Le prix par mètre carré de plancher en fonction de la longueur est représenté, pour chaque profil, par une hyperbole descendante. On suit une telle hyperbole pour des portées croissantes jusqu'à ce que l'on soit obligé de choisir une dalle plus lourde. Cela correspond à une marche dans la courbe des coûts. Il en résulte à nouveau une courbe en dents de scie (fig. g).

Evidemment, l'estimation de la partie des frais fixes par élément et de la partie qui augmente avec la longueur influence le profil de la courbe en dents de scie.



Les poutres

Un raisonnement tout à fait analogue peut être tenu dans le cas des poutres.

Il existe une très grande gamme de sections de poutres. Elles diffèrent du point de vue de la forme (section en I, en équerre, en trapèze,...) et des armatures (nombre et diamètre des barres). Chaque section est caractérisée par un poids propre, un moment résistant maximal et une capacité à reprendre des efforts de cisaillement. Dans le cas des poutres, la reprise des efforts de cisaillement est souvent plus critique que la reprise des moments fléchissants.

En tenant compte de ces divers facteurs, on établit une série de courbes qui expriment la charge utile maximale par mètre courant de poutre, en fonction de la portée (fig. h).

De même, dans le cas des poutres, une partie du coût est pratiquement indépendante de la longueur et donc constante par poutre. Par contre, une autre partie du coût est proportionnelle à la longueur: consommation de matériaux, coffrages latéraux,...

La relation entre les coûts en fonction de la longueur s'exprime aussi par une série de droites. Le prix par mètre courant de poutre est représenté par une série d'hyperboles (fig. i).

Si la poutre doit supporter une charge utile donnée par mètre courant (par exemple, dans le cas d'une largeur de plancher et d'une charge utile donnée par mètre carré de plancher), on retrouve à nouveau une courbe en dents de scie exprimant le coût par mètre courant de poutre. On constate une augmentation soudaine des coûts lorsqu'on passe à un type de poutre plus lourde, et ensuite une diminution selon une hyperbole descendante jusqu'au bond suivant (fig. j,k).

Les planchers et les poutres

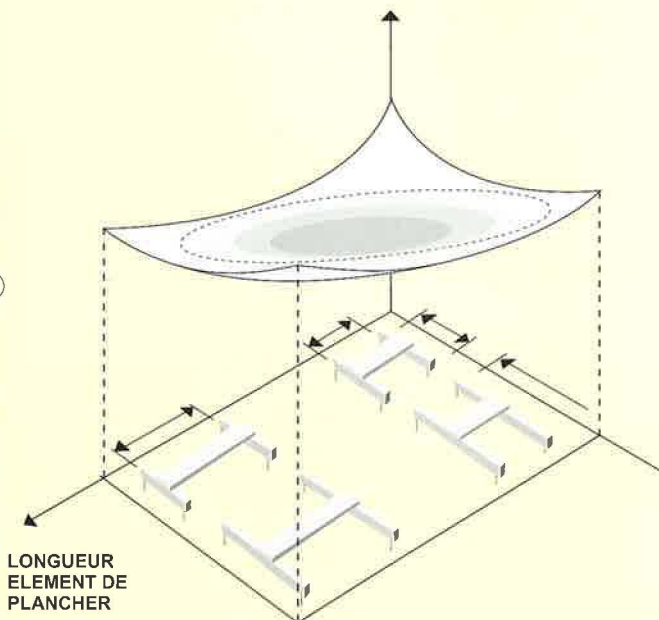
Pour obtenir le coût par mètre carré de l'ensemble du système (éléments de plancher + poutres), les deux courbes en dents de scie sont combinées: une portée plus grande pour les planchers entraîne des charges plus élevées pour les poutres.

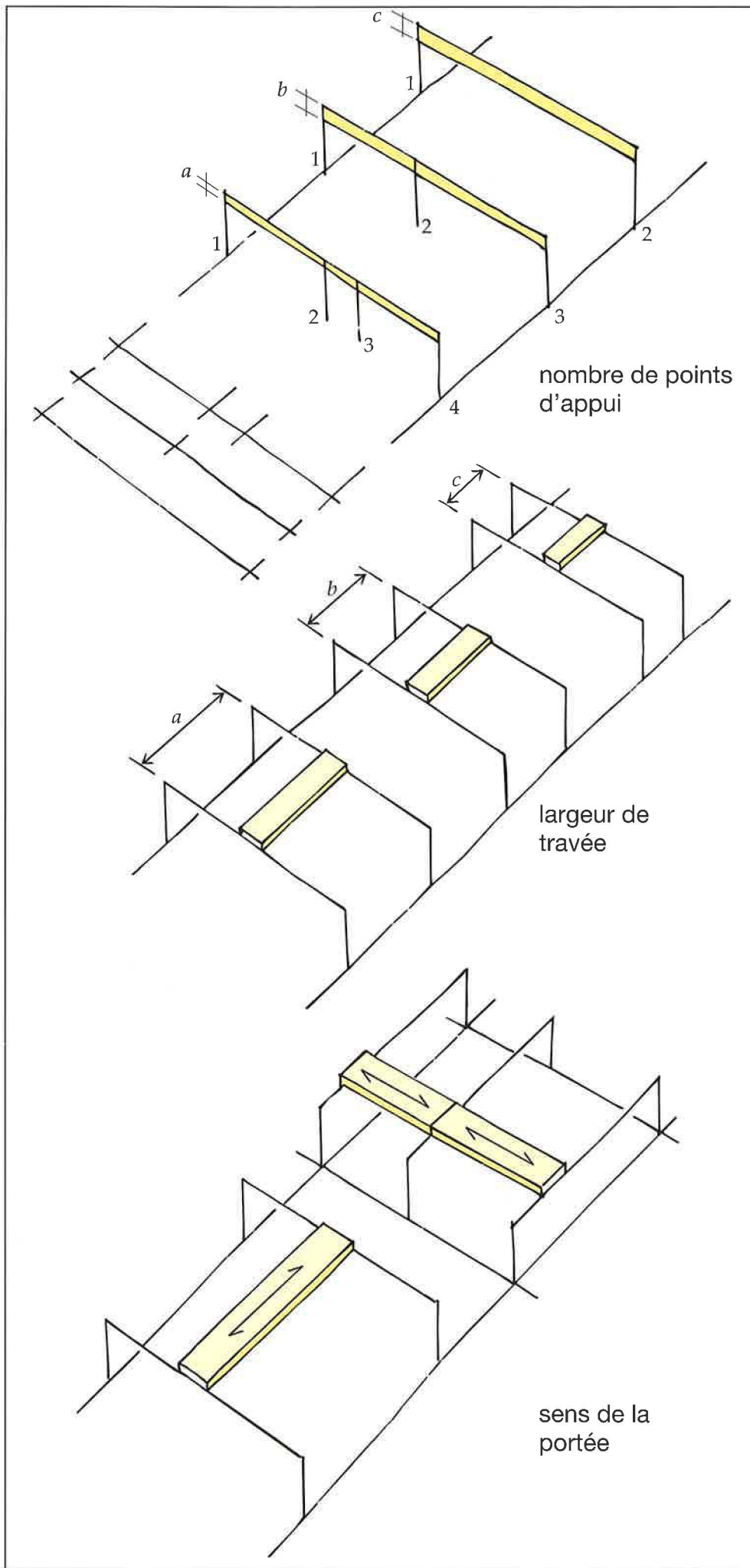
Le résultat peut être présenté approximativement au moyen d'un graphique tridimensionnel (fig. l). Le prix par mètre carré de plancher apparaît sous la forme d'une surface creuse doublement courbe et à l'évolution plutôt plate, c'est-à-dire sans minimum prononcé.

Une conclusion importante peut être tirée de ce graphique: si on considère que de plus grandes portées augmentent les possibilités de répartition et de réutilisation de la structure à l'avenir, il ne faut surtout pas essayer de réduire les coûts en réduisant les portées!

D'autres éléments (façade, toiture, dalle sur terre-plein, fondations, finition du plafond et du sol, parois intérieures...) joueront souvent un rôle beaucoup plus important.

COÛT / m² de PLANCHER





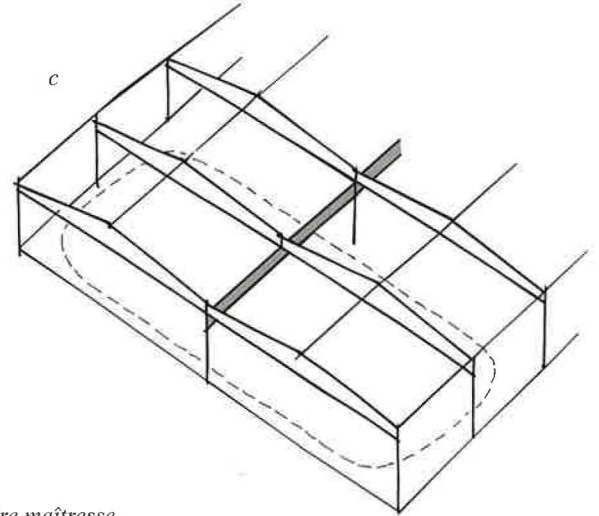
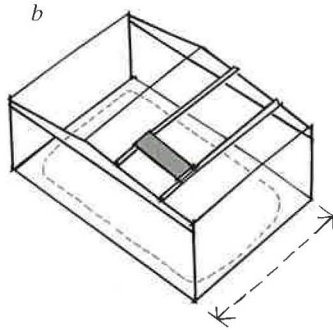
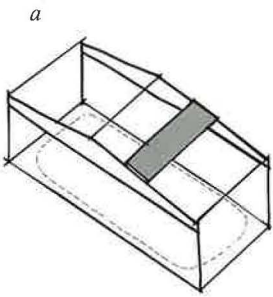
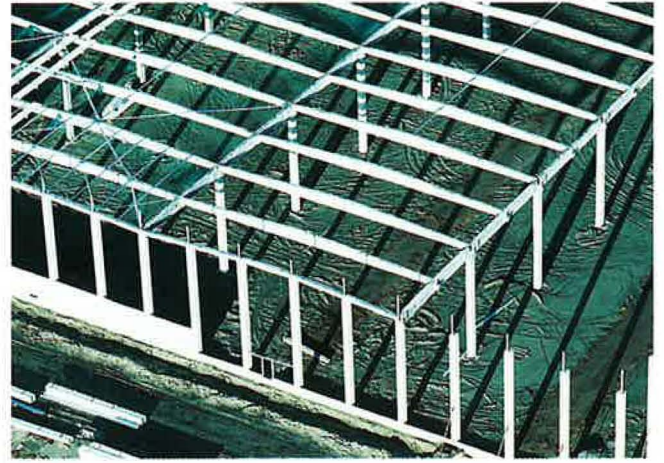
Le choix du canevas et des portées doit faire l'objet d'une évaluation judicieuse.

- Des portées plus petites sous-entendent un nombre plus élevé de points d'appui, et conduisent à un zoning implicite de l'espace disponible.

Des portées plus longues demandent des poutres plus hautes et davantage d'armatures, mais laissent plus de liberté de (ré)aménagement.

- Une largeur de travée plus faible correspond à des éléments de plancher ou de toiture plus courts, mais nécessite un nombre plus grand de portiques.

- La direction de portée des éléments de structure constitue une autre donnée importante. Elle intervient en outre dans la conception des installations et canalisations.



Exemples de structures de toiture :

a - dalles de toiture reposant sur les poutres

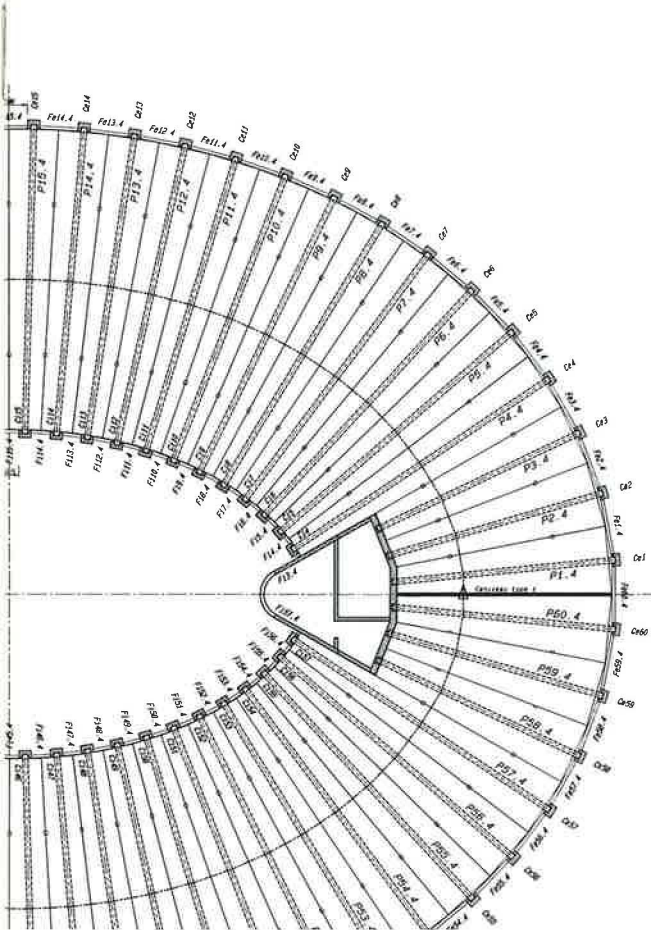
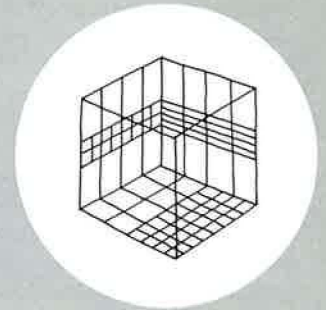
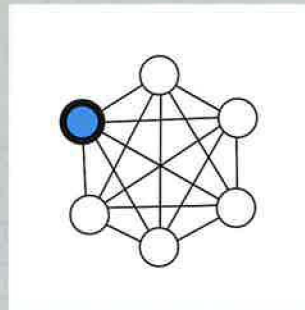
b - (à partir d'une certaine entre-distance :) nécessité d'utiliser des pannes

c - (afin de réduire le nombre de colonnes :) poutres de toiture reposant sur poutre maîtresse



La trame: aide ou entrave ?

- Le canevas
- Le plan de masse
- Les systèmes de construction
- Les équipements
- L'ossature et les éléments de remplissage



Beaucoup de bâtiments sont conçus sur base d'une trame et un certain nombre d'entre eux sont considérés comme de bons exemples d'architecture. Certains concepteurs n'aiment pas du tout les trames parce qu'ils trouvent qu'elles limitent leur liberté de création. Pour d'autres concepteurs, elles permettent de maîtriser la régularité, le rythme, la symétrie et les proportions.

Il est clair que les trames jouent un rôle dans le débat sur les formes d'architecture.

De nombreux produits standard ont des dimensions nominales qui sont des multiples des modules de trames de base. Les trames offrent la possibilité de faire correspondre les séries de production lors de la préfabrication, d'assurer la coordination dimensionnelle entre les divers composants de la construction et l'interchangeabilité de différents éléments, de prévoir l'adaptabilité de l'ossature,...

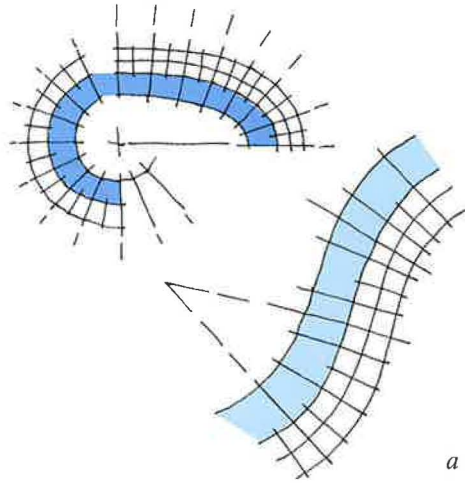
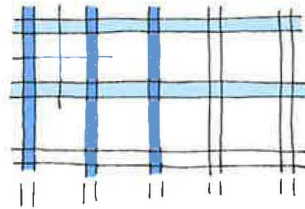
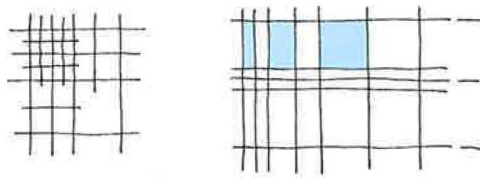


Smithkline Beecham, Rixensart - SAMYN and PARTNERS, architects and engineers (photos M. Detiffe)

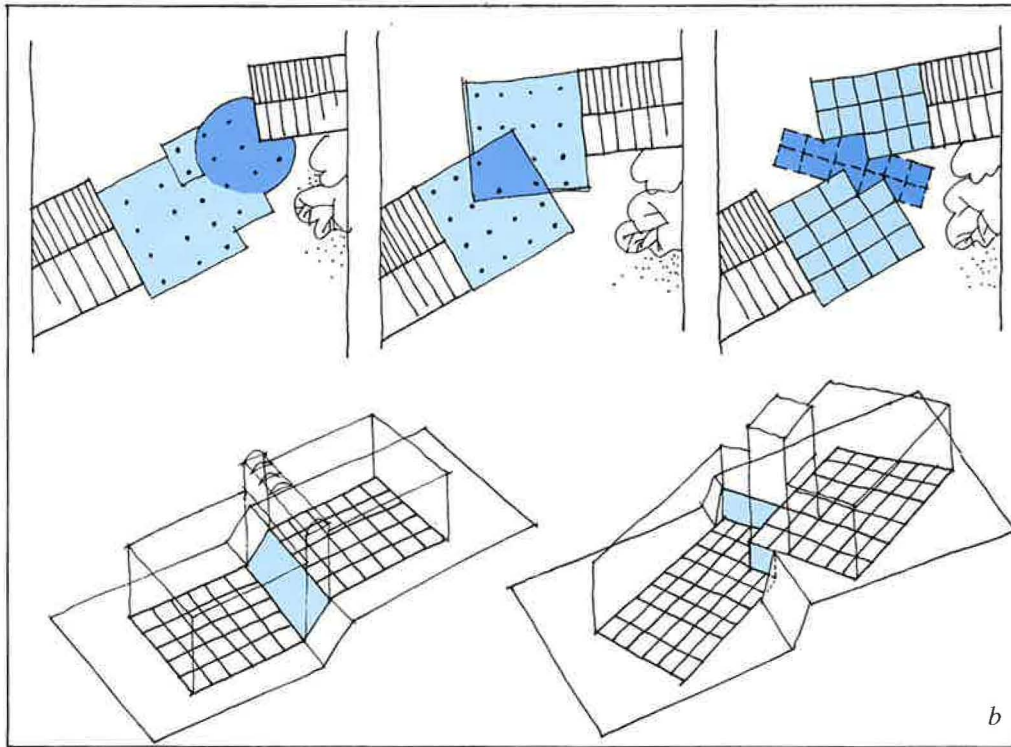
Souvent les trames sont identifiées à des plans rigides et uniformes. Pourtant, outre les variantes sur les trames rectilignes (p.ex. le tartan), il existe également des trames basées sur des arcs, des ovales ou des ellipses (a).

Des contraintes telles que des terrains irréguliers ou des pentes n'excluent pas nécessairement l'utilisation de trames. En fait, les interruptions dans une trame ou la transition vers une autre trame constituent souvent des éléments architecturaux intéressants (b).

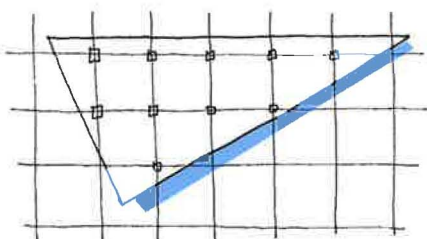
Encorbellements, réservations et enchevêtrements permettent de greffer des formes libres sur une trame (c, d).



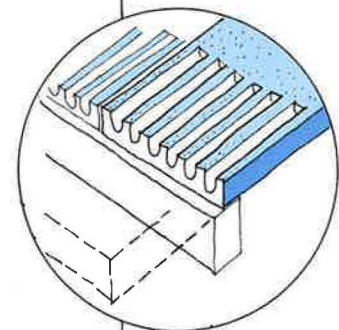
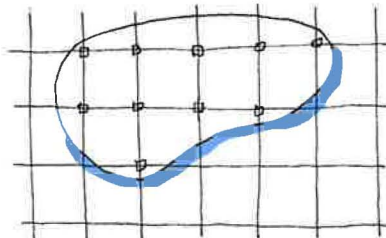
a



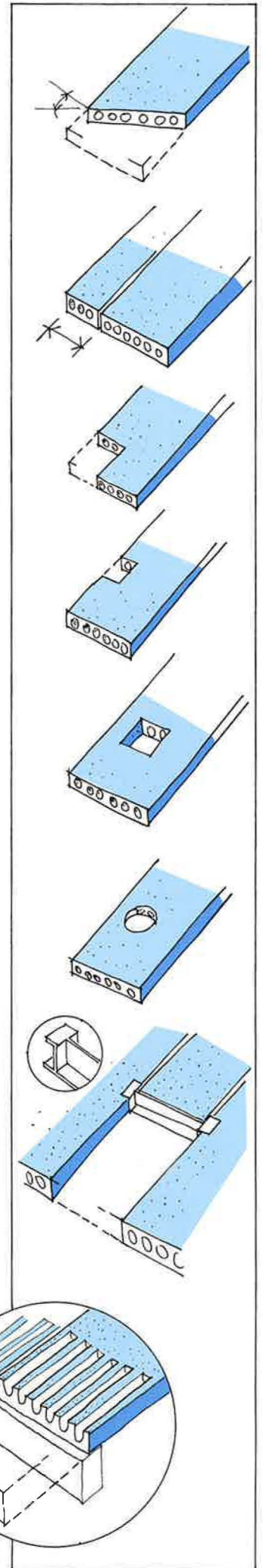
b



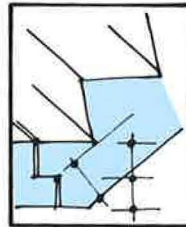
c



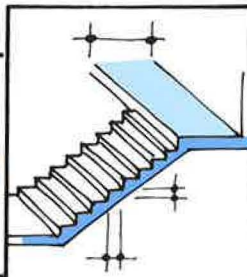
d



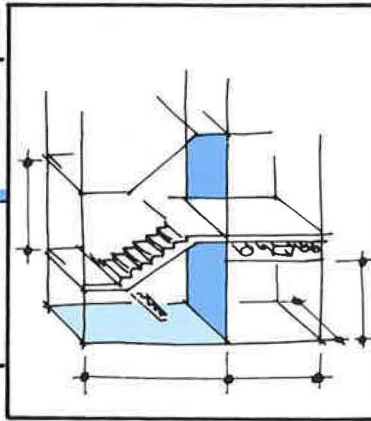
Types de dimensions : exemples



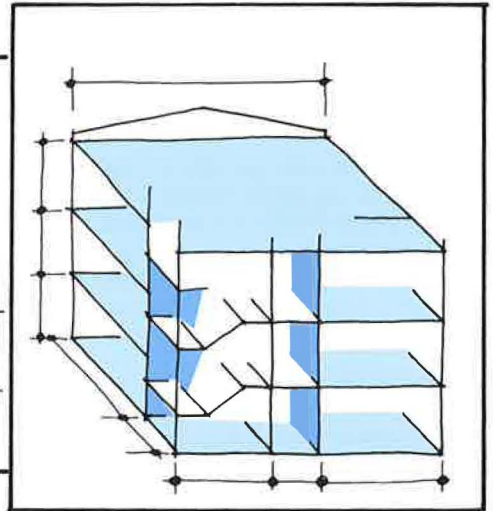
TECHNIQUES



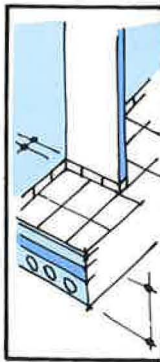
FONCTIONNELLES



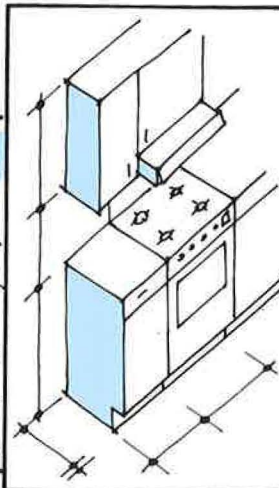
SPATIALES



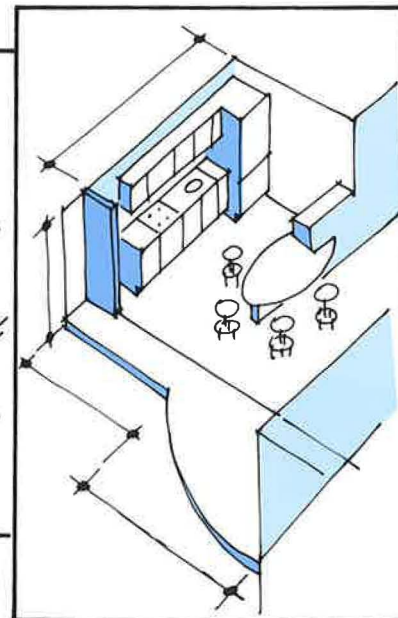
STRUCTURELLES



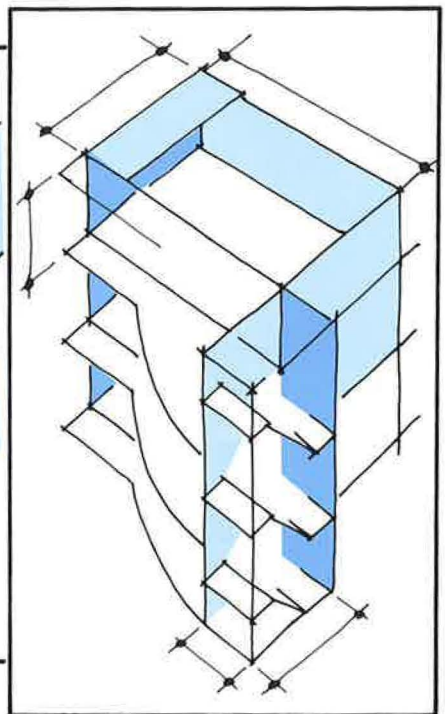
TECHNIQUES



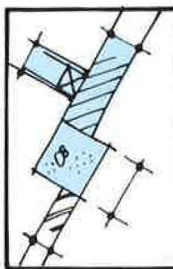
FONCTIONNELLES



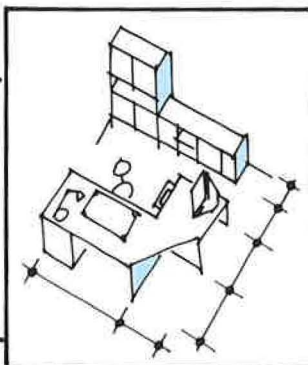
SPATIALES



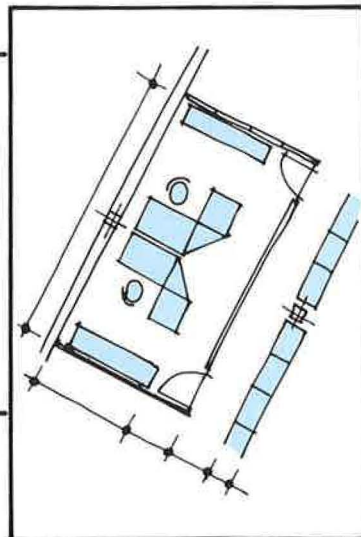
STRUCTURELLES



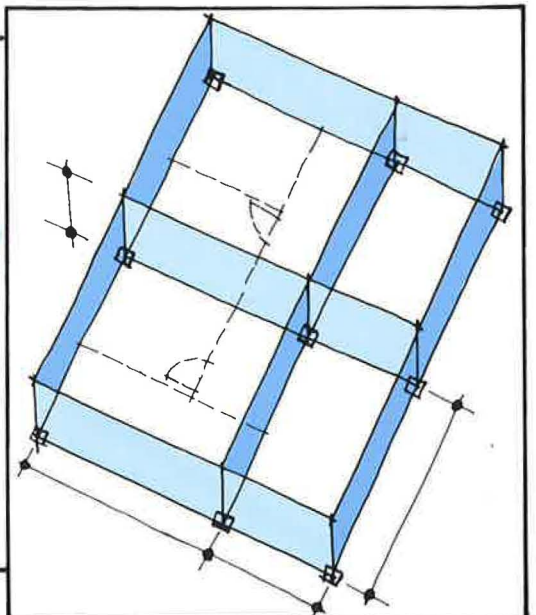
TECHNIQUES



FONCTIONNELLES



SPATIALES



STRUCTURELLES

L'ergonomie comme point de départ des trames d'esquisse

Si l'auteur de projet décide d'utiliser une trame, quel module doit-il choisir?

Le module de 10 cm (M) est généralement accepté. Cependant, il conduit à un maillage plutôt petit. Si, dans le but de limiter la variation, un module plus grand est nécessaire, quelle est alors la bonne solution?

Dans beaucoup de cultures, de l'Europe au Japon, le 'pied' est utilisé, non seulement comme unité de mesure, mais aussi comme module de conception dans le plan horizontal. Ce module traditionnel est arrondi à 3M (30 cm), ce qui semble être un point de départ pragmatique.

Bien que le module 3M soit très répandu, il se révèle souvent encore trop petit. Pour limiter la variation, le choix d'un module encore plus grand est indispensable. Ce choix devra se baser sur un certain nombre de considérations fonctionnelles et ergonomiques.

Deux dimensions de mailles sont très courantes: 60 cm et 90 cm. La largeur enveloppante d'une personne statique est d'environ 6M (60 cm) : ceci correspond à la profondeur d'une garde-robe, le volume autour d'une personne assise,...

Dans le cas d'une personne en mouvement, on retient un gabarit de 9M (90 cm), soit la largeur d'une porte, la dimension d'une douche, l'escalier pour une personne,...

Dans tous les cas, les dimensions sont arrondies. Si l'on considère des maillages encore plus grands, des combinaisons peuvent être envisagées: 120, 150, 180 cm...

Les espaces d'un bâtiment sont conçus pour accueillir un certain nombre d'activités fonctionnelles. Il arrive que la structure corresponde aux espaces, mais il est souvent nécessaire qu'une zone de la structure puisse être subdivisée de différentes façons. Logiquement, les dimensions des espaces et des structures seront basées sur des multiples du module fonctionnel choisi.

Une trame établie sur la base d'un module fonctionnel doit permettre de prendre rapidement une série de décisions au moment de l'esquisse. Une telle trame ne pourra en aucun cas être justifiée jusqu'au dernier centimètre.

L'utilité fonctionnelle est surtout critique pour les petits espaces tels que salle de bains, WC, hall d'entrée, cuisine, garage, ... Dans le cas de locaux plus grands, tels que salle de réunions, salle des fêtes, etc., les exigences fonctionnelles sont moins strictes. Il s'agit dans ces cas d'un enchaînement de fonctions définies seulement de manière approximative et statistique.

Un module différent par type de dimension

La norme belge NBN B04-001 est basée sur ces considérations fonctionnelles. Elle propose, entre autres, des modules pour les dimensions fonctionnelles, les dimensions spatiales et les dimensions structurelles dans le plan horizontal. Toutefois, tous les modules s'intègrent dans une démarche cohérente.

Dimensions de coordination horizontales	Ordre de préférence		
	1 ^{er}	2 ^e	3 ^e
Dimensions de coordination structurelles	18M	6M	3M
Dimensions de coordination spatiales	6M	3M	1M
Dimensions de coordination fonctionnelles	3M	1M	M/2
Dimensions de coordination techniques	1M	M/2	M/4

En fonction du projet, le concepteur peut tendre à une modulation plus stricte (1^{er} choix) ou plus souple (2^e ou 3^e choix). Un choix moins contraignant à un niveau supérieur n'empêche pas de suivre une modulation plus stricte à un niveau inférieur. Ainsi, par exemple, le deuxième choix pour un module structurel (6M) horizontal n'empêche en rien le premier choix pour un module spatial (6M).

Des conventions analogues ont été adoptées pour la trame d'esquisse en coupe verticale, avec 1M (10 cm) comme premier choix pour les dimensions fonctionnelles et 2M (20 cm) pour les dimensions spatiales ou structurelles. Ainsi, dans ce cas, le choix d'un module moins contraignant à un niveau supérieur n'empêchera pas non plus d'être plus strict à un niveau inférieur.

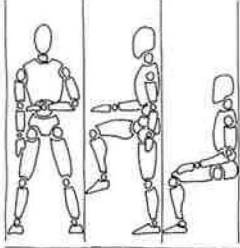
Dimensions de coordination verticales	Ordre de préférence		
	1 ^{er}	2 ^e	3 ^e
Dimensions de coordination structurelles	2M	1M	M/2
Dimensions de coordination spatiales	2M	1M	M/2
Dimensions de coordination fonctionnelles	1M	M/2	M/4
Dimensions de coordination techniques	M/2	M/4	M/8

Les modules proposés pour les dimensions verticales sont plus petits que pour les dimensions horizontales. Les dimensions verticales sont en effet plus sensibles d'un point de vue ergonomique (hauteur d'une surface de travail, d'un garde-corps, des baies de fenêtres, d'une marche,...) et esthétiquement plus délicates (l'harmonie des proportions s'aperçoit d'abord dans le plan vertical).

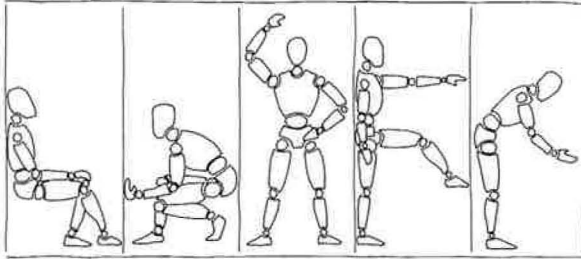
3M



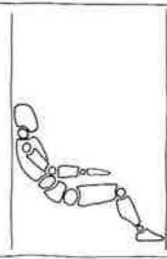
6M



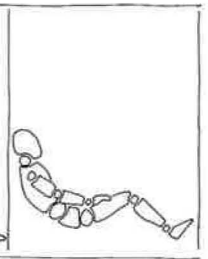
9M



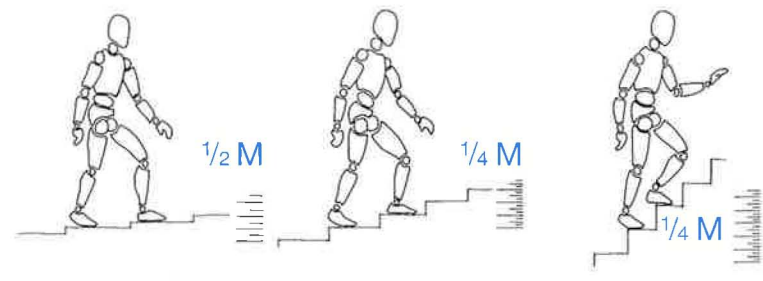
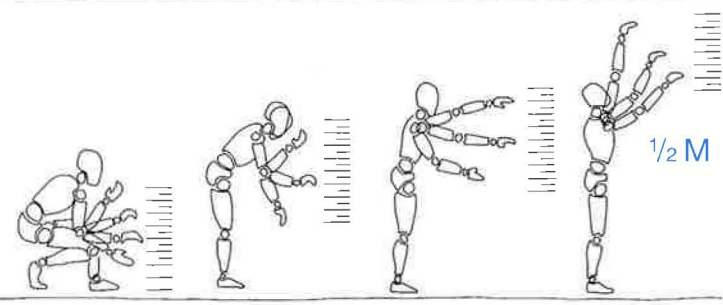
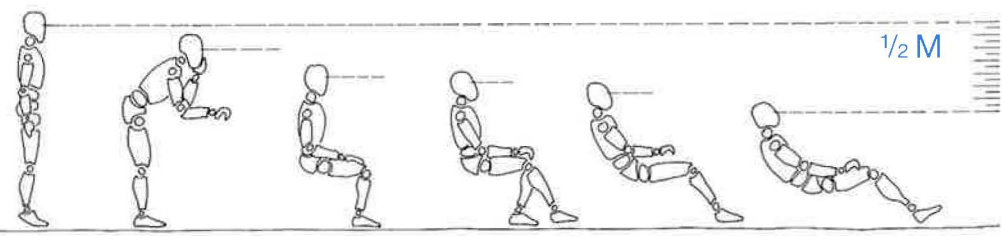
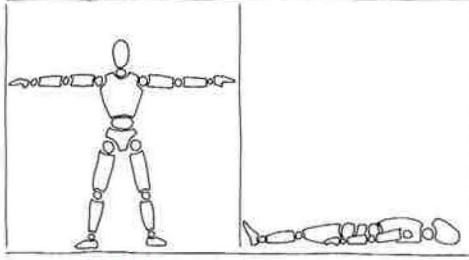
12M

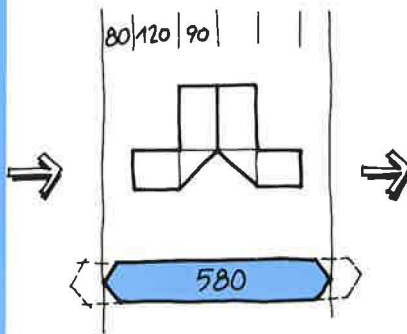
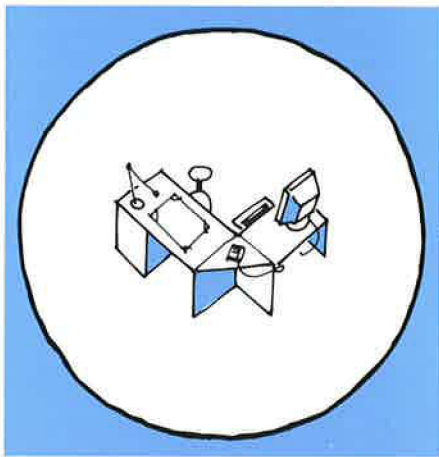


15M



18M

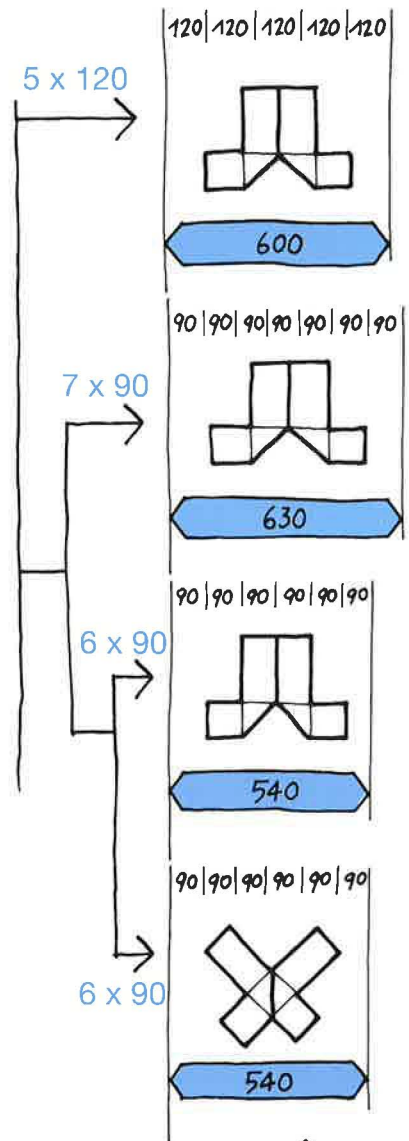




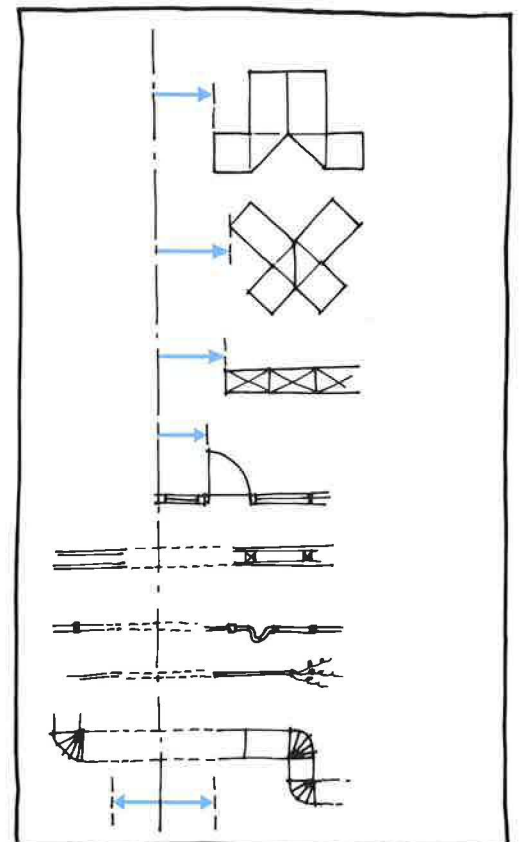
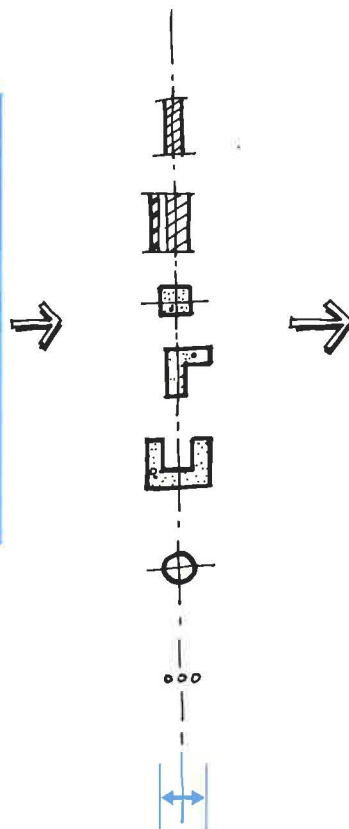
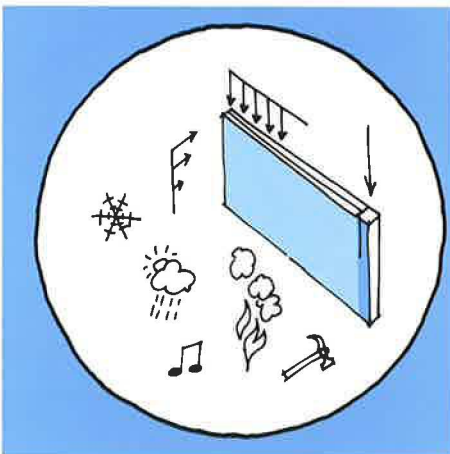
EXIGENCES FONCTIONNELLES ET CHOIX D'UN MODULE



Le choix d'une trame ne suit pas un parcours rectiligne. Les exigences fonctionnelles (utilisation de l'espace, confort...) et les performances des matériaux ne doivent pas être considérées indépendamment les unes des autres. Lors du dimensionnement de la structure portante, il faut veiller à ce que l'utilité fonctionnelle de la trame soit préservée. Le dimensionnement des éléments de finition constitue également un critère important.



PERFORMANCES ET CHOIX DES MATERIAUX



La trame d'esquisse

Une trame d'esquisse sert à faire des choix rapides et pragmatiques parmi un nombre infini de combinaisons de dimensions. Le concepteur ne souhaite pas s'occuper de la coordination dimensionnelle de détails plus qu'il n'est nécessaire : doit-il, par exemple, prendre 87,5 cm, 89 cm ou 91 cm... ? Les mailles de la trame seront choisies à partir de l'ergonomie et de l'utilité fonctionnelles des locaux. En outre, la trame ne sera pas déterminée exclusivement en fonction du premier programme de construction, mais permettra des réorganisations fonctionnelles futures. Il faut intégrer autant que possible le concept de réutilisation lors de la démarche de conception.

Les trames ne sont pas seulement destinées à faciliter le choix d'une disposition fonctionnelle au stade de l'esquisse. Elles permettent aussi de rendre possible la combinaison et l'interchangeabilité des produits de construction. Il devient clair que le travail de conception n'est pas un processus direct qui consisterait à fixer d'abord la disposition fonctionnelle et à choisir ensuite les matériaux. Il se peut que, par exemple, à cause de spécifications techniques, de règlements d'urbanisme ou de préférences du maître de l'ouvrage, les choix des matériaux soient fixés avant la phase de l'esquisse. Il est parfois nécessaire, dès le début de la conception, d'étudier en détail les choix de matériaux et les dimensions techniques qui en découlent. Cette démarche permet de vérifier si certaines dispositions fonctionnelles sont possibles. On peut ainsi se demander, par exemple, si l'épaisseur de la colonne ne conduit pas à rendre le couloir trop étroit ou encore si la position du conduit d'aération, en-dessous d'une poutre, ne conduit pas à adapter la hauteur de l'étage,... Toutefois, le concepteur fixera souvent les options principales lors de l'analyse fonctionnelle de l'espace, tandis qu'il essaiera de reporter à plus tard le choix d'un matériau précis et les aspects de l'étude technique du dimensionnement.

Les joints et les nœuds de construction

Pour qu'une esquisse aboutisse à des détails de construction adaptés aux matériaux concrets, il faut encore clarifier deux concepts: les joints et les nœuds de construction.

Les joints

A condition que toutes les dimensions des composants du bâtiment soient déterminées, à l'aide d'une trame spatiale, basée sur un même module (par exemple 1M) dans les trois directions, il ne subsiste plus qu'un problème de joints. L'étude de ce problème est facilitée par l'introduction du concept '*volume coordinateur*', c.-à-d. un volume théorique entourant chaque composant du bâtiment.

Lors de chaque production, il existe des écarts de dimensions. Il est possible de les limiter mais, généralement dans ce cas, les coûts de production augmentent. C'est pour cette raison qu'un certain écart est 'toléré'.

Outre les différences de longueur des éléments, les faces d'about d'un élément en forme de prisme sont rarement tout à fait perpendiculaires. La plupart du temps, elles ne sont pas tout à fait lisses non plus et présentent donc une certaine rugosité.

Tous ces écarts, de même que les erreurs qui apparaissent sur le chantier lors du montage des éléments, sont repris par les joints. Le joint sert aussi à compenser les mouvements prévisibles durant la vie des ouvrages. Ces mouvements sont provoqués par diverses sollicitations (mécaniques, thermiques, hydriques,...). Le joint doit donc être suffisamment large pour permettre ces écarts dimensionnels sans pour autant être trop large. Le matériau de remplissage du joint doit permettre à celui-ci de respecter

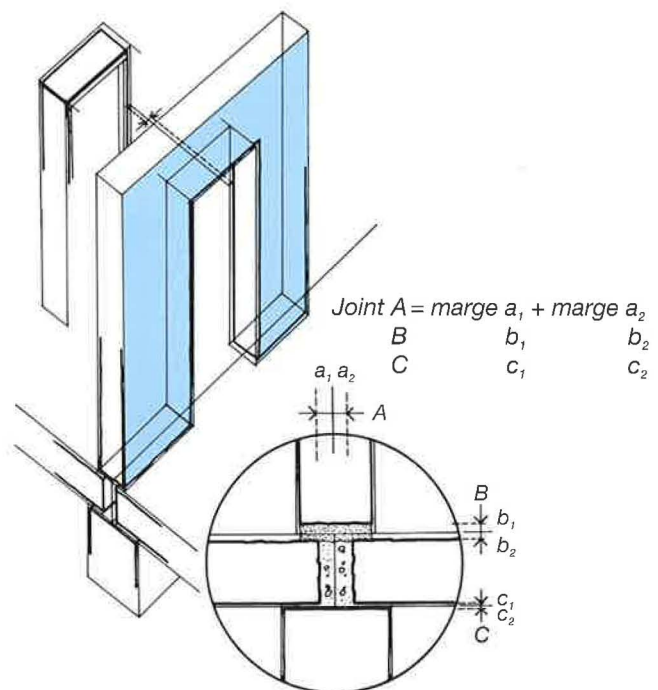
les diverses exigences telles que, dans le cas d'un mur extérieur, par exemple, l'étanchéité à l'eau et au vent, la résistance à la compression, la résistance au feu et l'isolation acoustique,... Par ailleurs, des joints trop étroits rendent souvent difficile la pose d'un matériau de remplissage.

Le problème du joint exige donc, dans de nombreux cas, une étude approfondie. Grâce au concept du '*volume coordinateur*', ce problème peut être formulé avec précision en le distinguant du problème des '*nœuds de construction*' (voir ci-après).

De part et d'autre d'un élément en forme de prisme, par exemple, on associe une marge. Cette marge est la partie du joint reliée de façon conceptuelle à la face terminale de l'élément, afin de tenir compte de l'écart de dimension mentionné plus haut. La marge est parfois plus grande ou plus petite dans les différentes directions: comparez, par exemple, la marge sous un mur (système de réglage) avec la marge au-dessus de ce mur (pose à sec d'un élément de plancher).

Un tel volume coordinateur a des dimensions correctes à cent pour cent, il est parfaitement perpendiculaire et tout à fait droit. Si les dimensions de tous les volumes coordinateurs sont des multiples de 1M, ces volumes peuvent être parfaitement adaptés à une trame spatiale sur la base de 1M. Les dimensions à atteindre lors de la production peuvent être déduites, en prévoyant des marges adaptées. Ces marges dépendent des propriétés des matériaux, des modes de production, des techniques de montage, des conditions ambiantes futures,... Dans les figures suivantes, tous les composants sont dessinés avec une marge. Dans la description ci-après du problème des nœuds de construction, l'épaisseur des marges n'a pas d'importance. Les faces des volumes coordinateurs et les lignes de la trame coïncident.

Volume coordinateur, marges, joints



Les nœuds de construction

La figure b ci-dessous montre ce qui se passe dans le cas d'une trame basée sur des 'multimodules' (nM). Tous les éléments ont ici la même épaisseur et la même longueur que les composants correspondants de la figure a. Les éléments ont été placés de telle sorte que l'axe dans le sens de la longueur de leur volume coordinateur corresponde avec une ligne de la trame multimodulaire. Sur cette esquisse, plusieurs volumes coordinateurs se chevauchent : évidemment, ceci est physiquement impossible. Nous appelons ce chevauchement le problème du 'nœud de construction'. Ce problème découle du fait que les longueurs des différents volumes coordinateurs ne peuvent pas tous être multiples de multimodules. Certains éléments devront être plus longs ou plus courts en raison de la liaison avec d'autres éléments. Cette liaison est parfois complexe: un élément plus long, un autre plus court, avec pièce d'ajustement, etc. (fig. c)

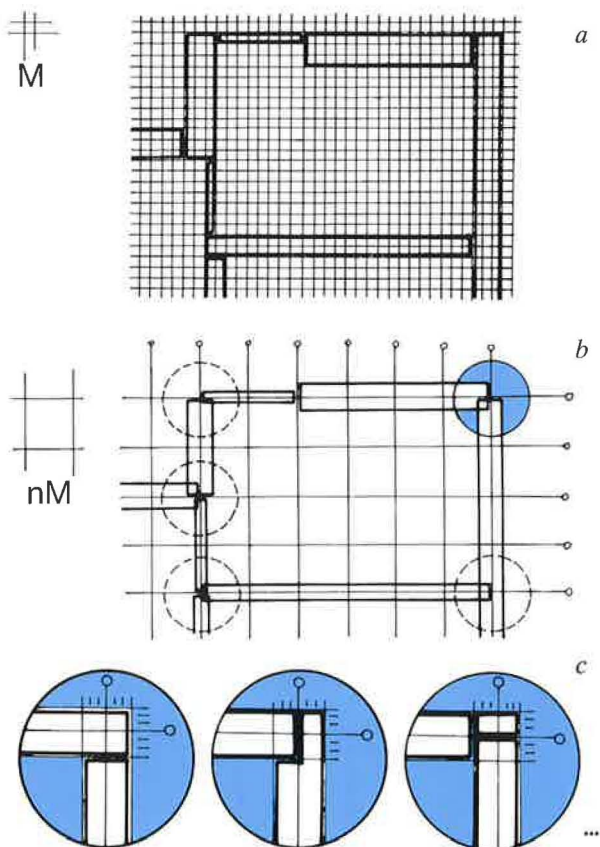
Le choix d'un type de trame et des conventions de positionnement des éléments sur cette trame doit être fait au moment où l'esquisse est élaborée plus en détail.

Plusieurs solutions sont toujours possibles (voir page 9):

- Les volumes coordinateurs sont positionnés de telle sorte qu'au lieu de leur axe, l'une ou l'autre ligne de référence corresponde à la trame multimodulaire.
- Les volumes coordinateurs sont positionnés de telle sorte que l'interface dans le sens de la longueur corresponde à la trame multimodulaire.
- La trame est interrompue sur une certaine zone. Cette zone peut, par exemple, être aussi large que l'épaisseur du volume coordinateur du composant prévu dans cette zone.

Il convient de garder une vue d'ensemble sur la totalité du travail. Des règles peuvent être adoptées afin de limiter le nombre d'exceptions dans le cas d'une famille

Nœuds de construction



spécifique d'éléments de construction, tels que les dalles par exemple. Pour résoudre le problème des nœuds de construction, les écarts seront alors reportés vers d'autres éléments, tels que les murs par exemple.

Le problème se pose aussi bien dans le sens horizontal que vertical. Sur la figure a à la page 10, la longueur des parties blanches des volumes coordinateurs n'est pas un multiple entier du multimodule. Les éléments bleus sont, par contre, multimodulaires. Le nœud de construction est toujours un problème tridimensionnel. Dans le cas, par exemple, d'une paroi extérieure en coupe horizontale au coin d'un bâtiment et en coupe verticale en rive de toiture, le problème à résoudre est différent si l'on considère le côté gauche ou le côté droit de la partie inférieure ou de la partie supérieure (b).

Durant de nombreuses années, lorsqu'il fallait mettre au point des conventions de dimension modulaire, aucune distinction n'était faite entre les 'problèmes des joints' et les 'problèmes des nœuds de construction'. Quand ils étaient tout de même mentionnés, on agissait comme si ces écarts n'apparaissaient que très sporadiquement. Pourtant, les producteurs de gros éléments (murs entiers en une pièce, dalles, poutres et colonnes structurelles) y sont constamment confrontés.

Les problèmes des nœuds de construction viennent s'ajouter aux problèmes de joints:

- Les différences entre les dimensions de fabrication et les dimensions modulaires dues aux joints sont une question de quelques millimètres ou centimètres.
- Les différences dues aux nœuds de construction entre les dimensions multimodulaires de la trame d'esquisse et les dimensions du volume coordinateur sont une question de quelques centimètres ou décimètres.

Pour limiter les écarts de dimensions dus aux nœuds de construction, l'utilisation de sous-modules a été proposée. Pour ces dimensions techniques, la norme NBN B04-001 prescrit, dans le sens horizontal, les modules 1 M, 1/2 M et 1/4 M comme respectivement 1^{re}, 2^e et 3^e préférence. Dans le sens vertical, elle prescrit respectivement 1/2 M, 1/4 M et 1/8 M.

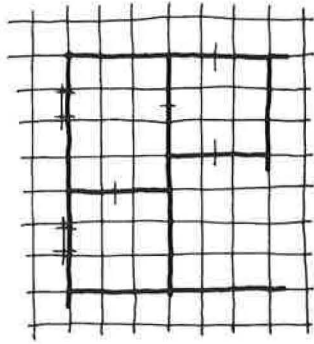
Arrondir les dimensions techniques à un multiple d'un sous-module conduit à des performances plus élevées, (résistance à la compression, isolation acoustique, capacité thermique)... mais également à une consommation de matériaux plus importante. Dans le cas des sols et surtout des poutres, cela signifie un poids propre plus élevé et donc des moments de flexion supplémentaires. Il faut donc toujours considérer les économies de production découlant de l'adoption d'une limitation dimensionnelle, par comparaison avec d'autres coûts supplémentaires.

Il se peut que certaines dimensions soient difficilement adaptables lors de la production (la coupe transversale d'un profil d'extrusion, une surface coulée contre un moule complexe,...). Par contre, d'autres dimensions peuvent être adaptées très facilement: la longueur d'un profil d'extrusion, la distance séparant des moules spatiaux complexes, la longueur d'une poutre en I, par exemple.

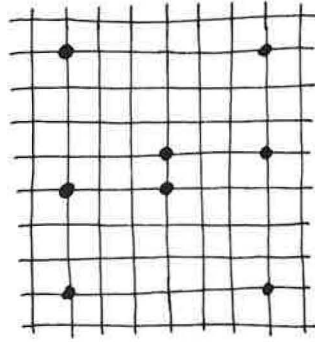
Il est généralement avantageux de maîtriser les écarts dus au nœuds de construction en utilisant des dimensions facilement adaptables lors de la production. Une compréhension de la problématique des nœuds de construction et des possibilités d'adaptation d'une technique de production doit permettre de prendre les bonnes décisions à cet égard.

Elaboration de l'esquisse

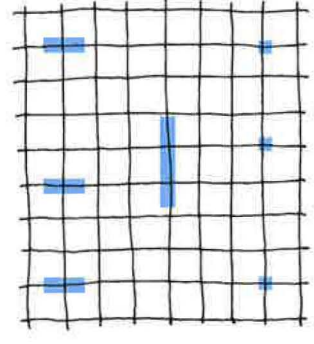
(trame d'esquisse:)



DISTRIBUTION



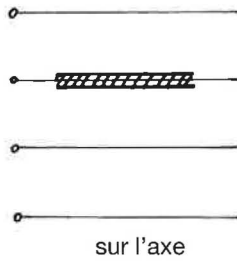
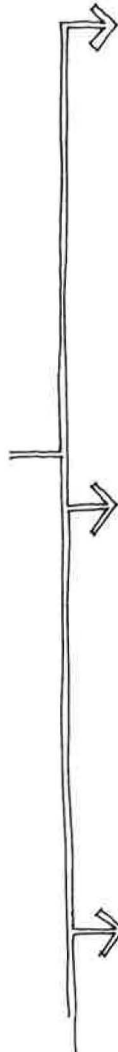
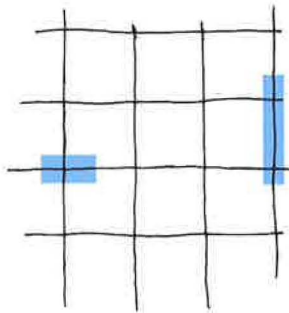
STRUCTURE PORTANTE



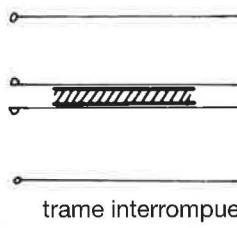
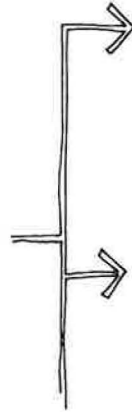
ELABORATION DE LA STRUCTURE PORTANTE

CHOIX D'UN TYPE DE TRAME ET CONVENTIONS DE POSITIONNEMENT

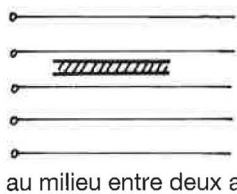
(détail:)



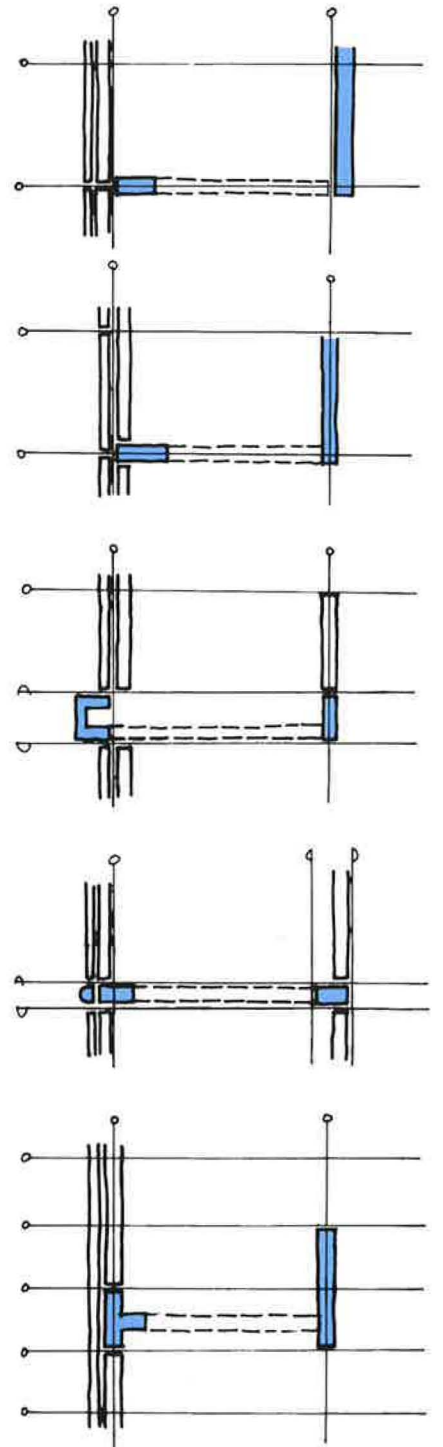
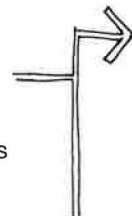
sur l'axe

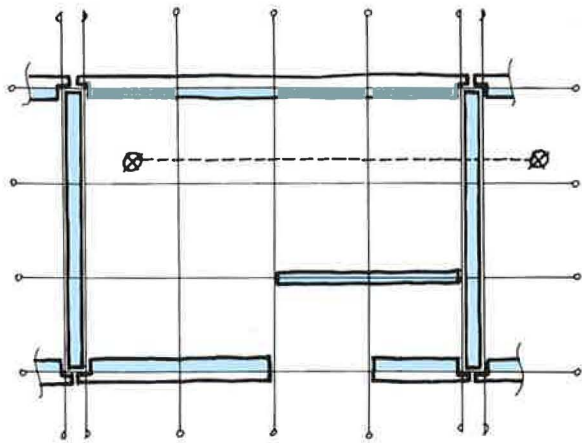


trame interrompue

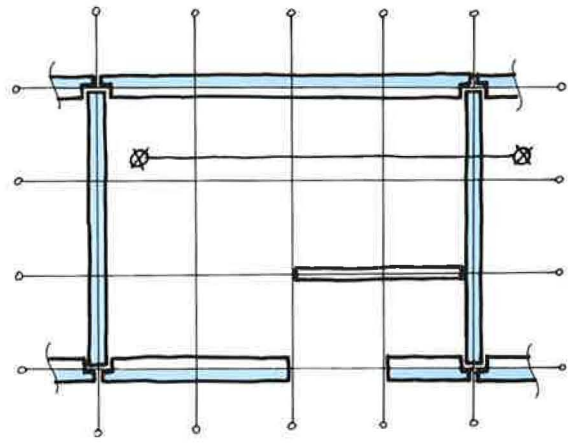


au milieu entre deux axes

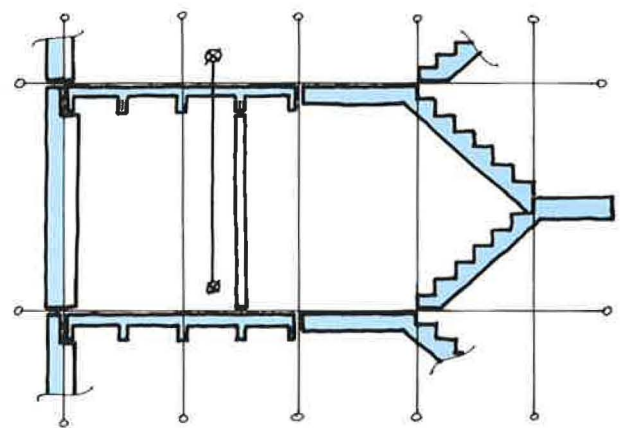
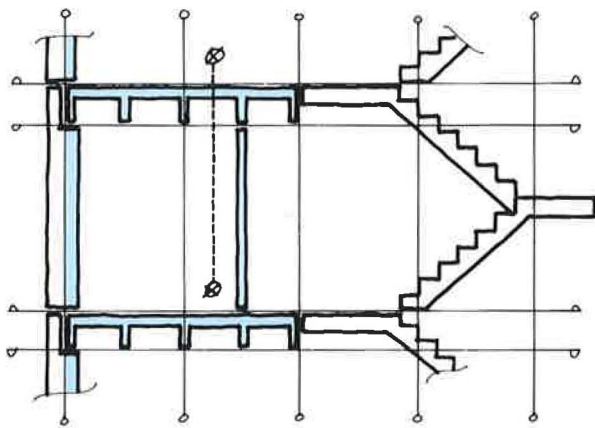




(plan)



(coupe)

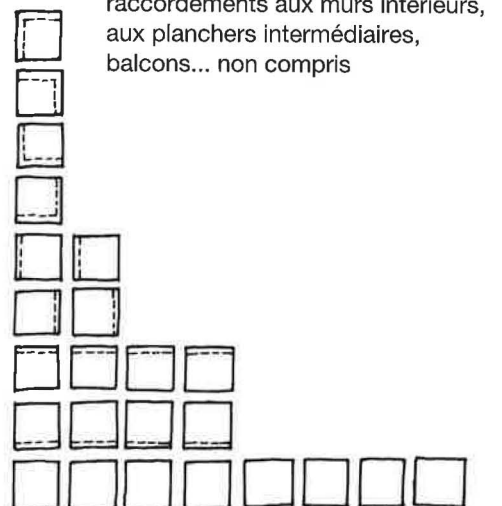
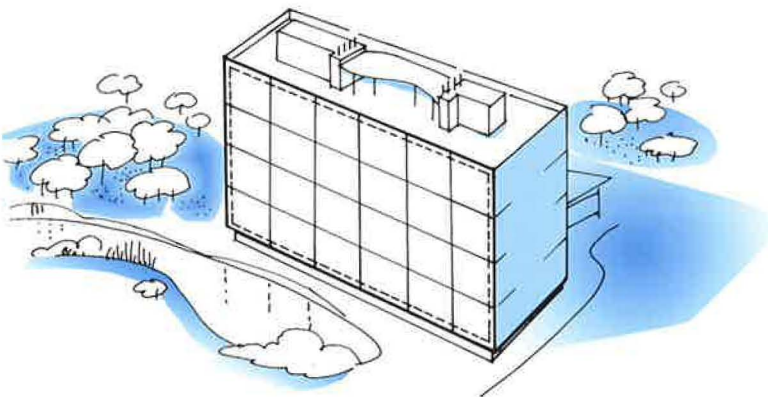


- multiple de nM
 - pas de multiple de nM
 - multiple de nM
 - - - pas de multiple de nM
- } conduits, canalisations

a

b

Exemple: 9 types différents de panneaux



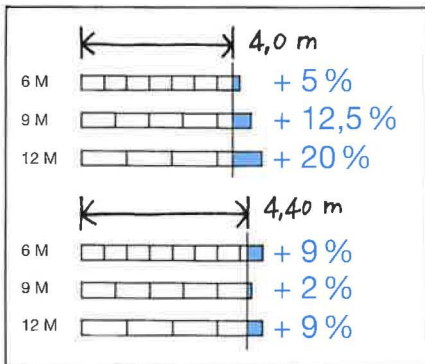
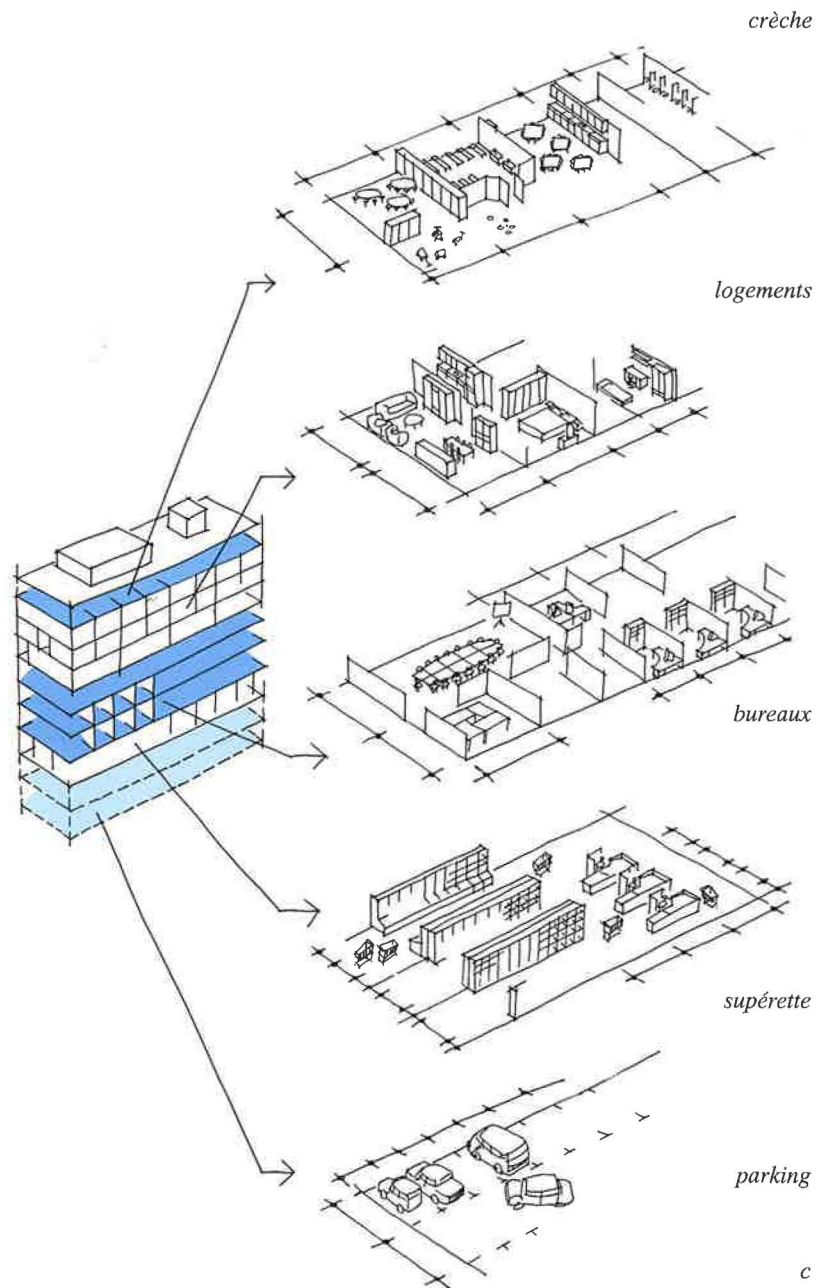
Les trames et les espaces "perdus"

Au stade de l'esquisse, la question se pose de savoir si, en utilisant une trame, il n'y a pas trop d'espace perdu. La dimension résultant de l'analyse fonctionnelle doit, en effet, être arrondie à la dimension modulaire supérieure.

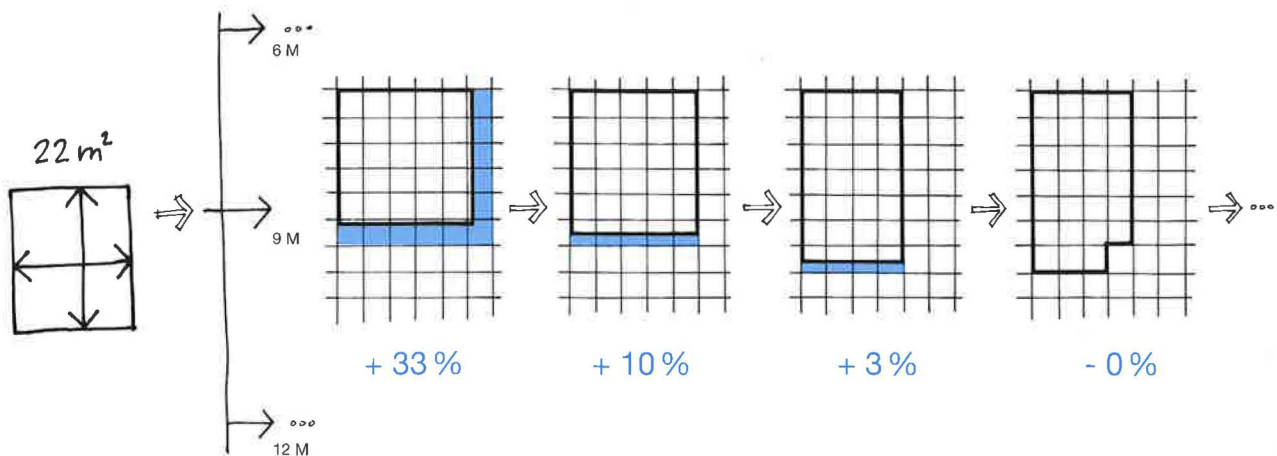
En réalité, le problème est plus complexe car, pour un programme fonctionnel donné, toutes les dimensions fonctionnelles n'interviennent pas aussi fréquemment les unes que les autres. Dans le cas du choix d'un multimodule particulier, les dimensions désirées peuvent être en moyenne juste en-dessous de la dimension modulaire et ne générer donc qu'un petit supplément. Par contre, dans le cas d'un autre multimodule, la différence entre dimension fonctionnelle et dimension arrondie peut être, en moyenne, très grande (a).

Cela devient encore plus complexe quand l'exigence fonctionnelle est exprimée en m^2 de surface de sol, et quand la largeur est donc influencée par le choix de la profondeur, de telle sorte que celle-ci soit en moyenne juste en-dessous ou juste au-dessus d'une dimension multimodulaire (b).

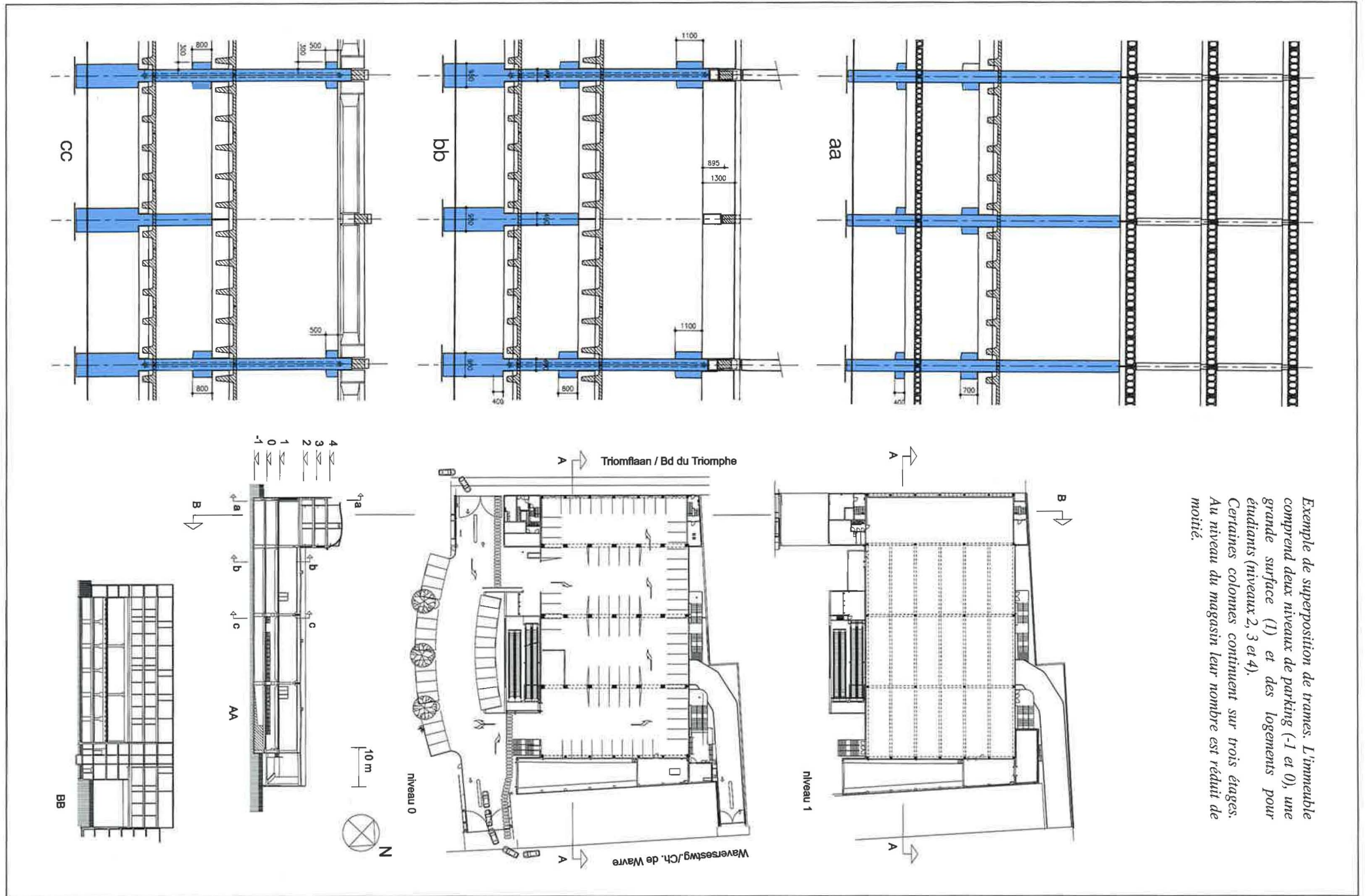
Plus le multimodule est grand, plus les pertes sont importantes. Toutefois, en admettant, dans le cas des plus grandes dimensions, que les exigences fonctionnelles ne sont jamais très strictes, il est généralement possible d'arrondir aussi souvent vers le haut que vers le bas : la perte est dans ce cas inexistante (c).



a



b



Exemple de superposition de trames. L'immeuble comprend deux niveaux de parking (-1 et 0), une grande surface (1) et des logements pour étudiants (niveaux 2, 3 et 4). Certaines colonnes continuent sur trois étages. Au niveau du magasin leur nombre est réduit de moitié.