

Escaliers

par **Paul-Henri GENÈS**
Ingénieur des Arts et Manufactures
Architecte DPLG

1. Terminologie.....	C 3 700 - 2
1.1 Données nécessaires au tracé	— 2
1.2 Données élémentaires : les marches	— 2
1.3 Volée, Échappée.....	— 2
2. Circulation et sécurité.....	— 6
2.1 Circulations collectives. Unité de passage. Débit	— 6
2.2 Ergonomie de la marche. Formule de Blondel	— 6
2.3 Applications : échappée en plan et paliers.....	— 7
2.4 Conditions de confort et de sécurité des usagers. Éclairage. Accès.....	— 7
2.5 Sécurité du public vis-à-vis des risques d'incendie.....	— 8
2.6 Ventilation des escaliers.....	— 8
3. Principes de construction	— 8
3.1 Formes et stabilité. Conception globale	— 8
3.2 Marches	— 9
3.3 Volée	— 9
3.4 Repos des volées : les paliers.....	— 10
3.5 Cage d'escalier.....	— 10
3.6 Hélices : fonction, stabilité et problèmes de calcul.....	— 10
4. Éléments de finition et confort.....	— 12
4.1 Garde-corps et mains courantes	— 12
4.2 Revêtement des marches.....	— 13
4.3 Entretien. Électricité statique.....	— 13
4.4 Clôture et aspect.....	— 13
5. Escaliers utilitaires	— 14
5.1 Dimensions usuelles des escaliers privés	— 14
5.2 Établissements recevant du public (ERP)	— 14
5.3 Immeubles de grande hauteur (IGH)	— 15
5.4 Plans types et tracé.....	— 15
6. Escaliers particuliers.....	— 16
6.1 Tracé	— 16
6.2 Marches. Balancement.....	— 16
6.3 Grands escaliers	— 17
7. Matériaux et techniques	— 18
7.1 Bois	— 18
7.2 Maçonnerie	— 19
7.3 Fer, fonte, acier	— 19
7.4 Autres métaux.....	— 19
7.5 Béton armé.....	— 19
7.6 Verre.....	— 19
7.7 Matériaux synthétiques.....	— 19
7.8 Mise en œuvre	— 19
Pour en savoir plus.....	Doc. C 3 700

La conception d'un escalier dans une construction, le choix de sa position et son tracé sont des problèmes d'architecture traités dans la rubrique Programmes d'architecture du présent traité avec les circulations dans les bâtiments. Cependant, il arrive lors de l'exécution que l'ignorance ou l'oubli des données pratiques correspondantes soit source d'erreurs qui nuisent à la qualité d'usage et d'aspect de cet élément important et très visible : il faut donc les rappeler brièvement sans développer ici leurs justifications ergonomiques ou autres. De même, les techniques de réalisation sont les mêmes que pour toute autre partie du bâtiment, sauf quelques particularités dues à la forme et aux fonctions qu'il suffira de préciser sans exposer en détail la technologie.

1. Terminologie

Étant admis que l'escalier, constitué de marches où le pied se pose sans glisser, est déjà mis en place et dessiné tel que l'exige la circulation, il faut rappeler le vocabulaire indispensable pour être compris des praticiens. Chaque élément d'un escalier a un nom précis dont l'objet est repéré sur la figure 1. On ne donnera pas tous les synonymes ni les mots anciens ou d'emploi moins usuel qui se trouvent encore dans beaucoup d'ouvrages.

Seuls les développements des paragraphes suivants permettront de saisir l'articulation entre les éléments définis ici.

1.1 Données nécessaires au tracé

La première donnée caractéristique est la **hauteur à monter H** que l'on peut définir comme la **hauteur de sol à sol** ou **hauteur d'étage**. C'est la **hauteur de l'escalier** s'il n'y a qu'un seul étage.

Le tracé de l'escalier a déterminé quelle est sa surface en plan et d'abord son **développé** qui est la mesure L du chemin horizontal à parcourir selon le tracé F en trait mixte de la **ligne de foulée** que l'on va suivre pour monter : c'est l'axe de circulation d'un individu. La ligne de foulée est souvent tracée dans l'axe des marches ou à 0,5 m d'une main courante. Le rapport H/L est la **pente moyenne** de l'escalier qui tient compte des paliers et caractérise le confort de la circulation. C'est à tort qu'il est souvent nommé inclinaison. La largeur du passage est l'**emmarchement** (1) mesuré entre les extrémités latérales de la surface horizontale des marches. La **largeur libre** (2) entre les mains courantes n'est généralement pas caractéristique, bien qu'un peu plus faible.

1.2 Données élémentaires : les marches

La marche ou degré est le plan horizontal sur lequel on pose le pied, et aussi le matériau qui le constitue. Sa plus grande dimension est toujours l'**emmarchement**. Sa largeur correspond à la longueur du pas, elle se mesure entre deux arêtes ou nez de marches successifs : c'est le **giron g** . La partie verticale limitant le fond de marche devant la marche supérieure est la **contremarche** dont la **hauteur h** est la hauteur de marche traditionnellement appelée **montée**. La **profondeur p** de la marche est sa largeur perpendiculaire à l'**emmarchement** entre le nez et le fond, assurant l'appui du pied : pour l'améliorer, le **nez de marche** peut être en saillie sur la contremarche ; il est souvent mouluré en **astragale**. Les schémas de la figure 2 justifient le mouvement du talon sous l'**astragale** lors de la descente de l'escalier, à la rotation des phalanges sur le métatarse. La **pente réelle** de l'escalier est le rapport h/g .

1.3 Volée. Échappée

La **volée**, suite de **trois marches au moins**, est la partie en pente, élément essentiel de l'escalier, encore parfois appelée **rampe**. Sauf pour un seuil ou un perron, une marche isolée ou un groupe de deux marches doivent être absolument évités.

Nous verrons dans une analyse plus fine (§ 3) que l'escalier est toujours dans une **cage**, construction assurant le report des charges et éventuellement la clôture, même si les volées ne sont pas encadrées dans des murs de cage (4) et qu'il se développe librement dans une **trémie** vide à la surface d'un plancher porteur. La volée porte sur le **repos** (5), ce qui est une tautologie en langage de charpente, le repos étant devenu synonyme de **palier** (6), partie de circulation horizontale entre les **rampes** inclinées, surtout si ce palier intermédiaire ne comporte pas d'**accès** (7) vers un étage avec lequel il soit de plain-pied.

Si les marches de la volée ne sont pas portées par une **paillasse** (8), dalle inclinée (figure 3a), elles sont entre **échiffres**, ces supports d'extrémité pouvant être soit des **murs** (figure 3b), soit des poutres inclinées ou **limons** (figure 3c). Pour laisser apparaître en bout le dessin des marches, y retournant s'il y a lieu l'**astragale**, le limon peut être découpé en **crémaillère** (figure 3d) et l'escalier est dit par les charpentiers à **l'anglaise**. Les marches dessinent aussi une crémaillère du côté libre d'une paillasse, tandis qu'elles s'encastrent par l'assemblage d'**emmarchement** dans les limons des escaliers à **la française** qui sont limités, s'ils sont vus du côté d'un vide ou **jour** (9), par des surfaces continues en rampes qui suivent la pente des nez de marches (figure 3c).

Le tracé des arêtes de limons ne peut pas être rectiligne à pente régulière : des ressauts sont inévitables au raccordement des poutres palières si les marches de départ des volées opposées montantes et descendantes ne sont pas décalées. Le problème est moins aigu dans un escalier à l'anglaise, mais la ligne des nez de marches mal dessinée est inélégante et la maladresse se juge à la sous-face (10) qui n'est trop souvent déterminée que par le plan de coffrage résultant du calcul de béton armé (figure 4) au lieu de réaliser un **plafond rampant** en continuité avec celui des paliers.

La pente réelle de l'escalier, qui est le rapport h/g , doit être constante.

La pente globale d'une volée suppose une marche palière puisque entre les deux contremarches extrêmes d'une volée, suite continue de n marches ($n = 8$ sur la figure 1), le développé est : $D = (n - 1)g$ pour une dénivellée totale $H = nh$.

Le tracé jadis fait par le charpentier en vraie grandeur sous le nom d'**épure** est toujours nécessaire à l'échelle des dessins pour l'étude de la stéréotomie dans l'espace qui, avant même l'étude des éléments de construction, doit assurer le contrôle de l'**échappée** E , distance libre entre les nez de marche et tout élément à l'aplomb (2,10 m à la verticale environ) (figure 5).

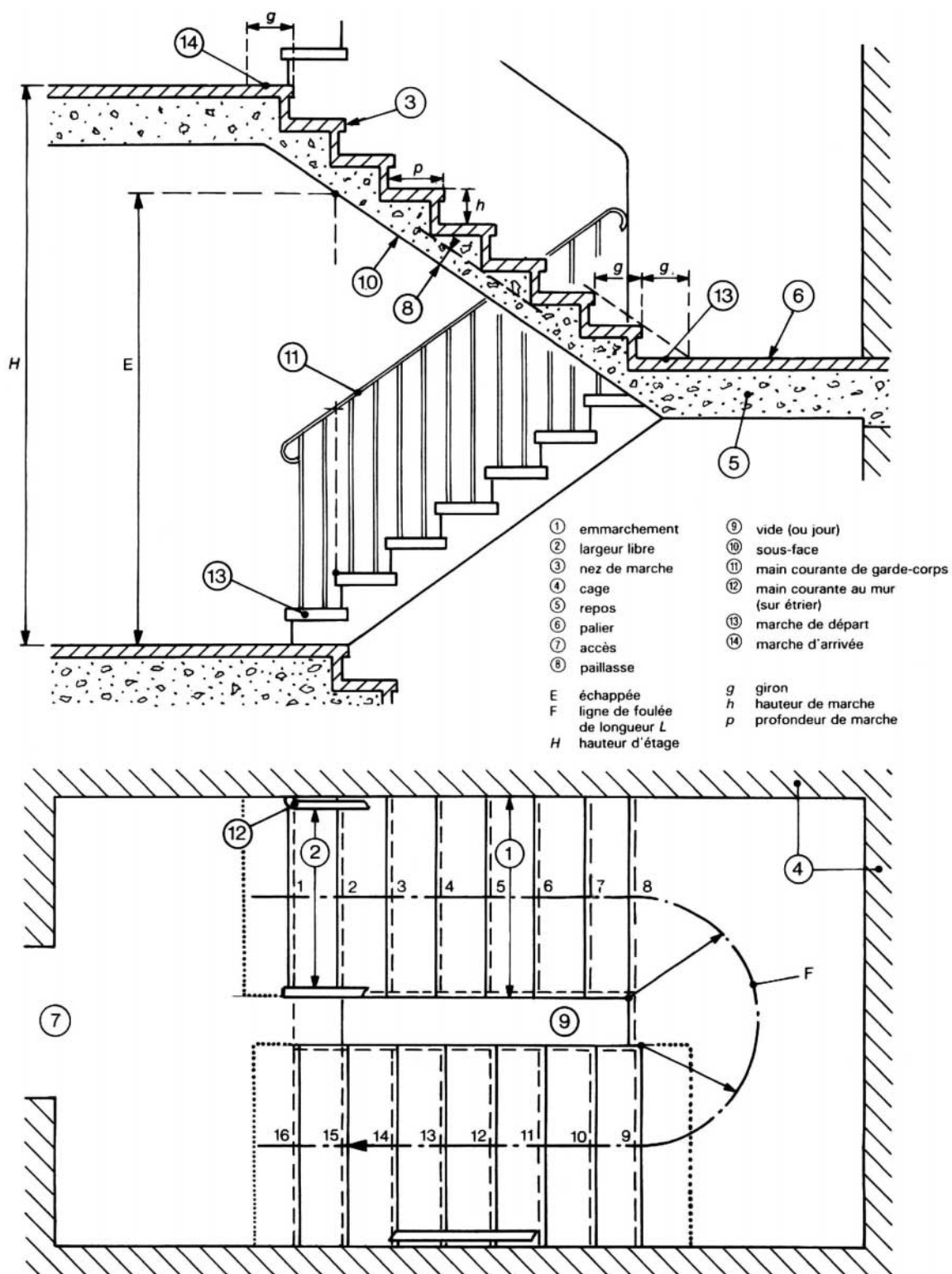


Figure 1 – Terminologie

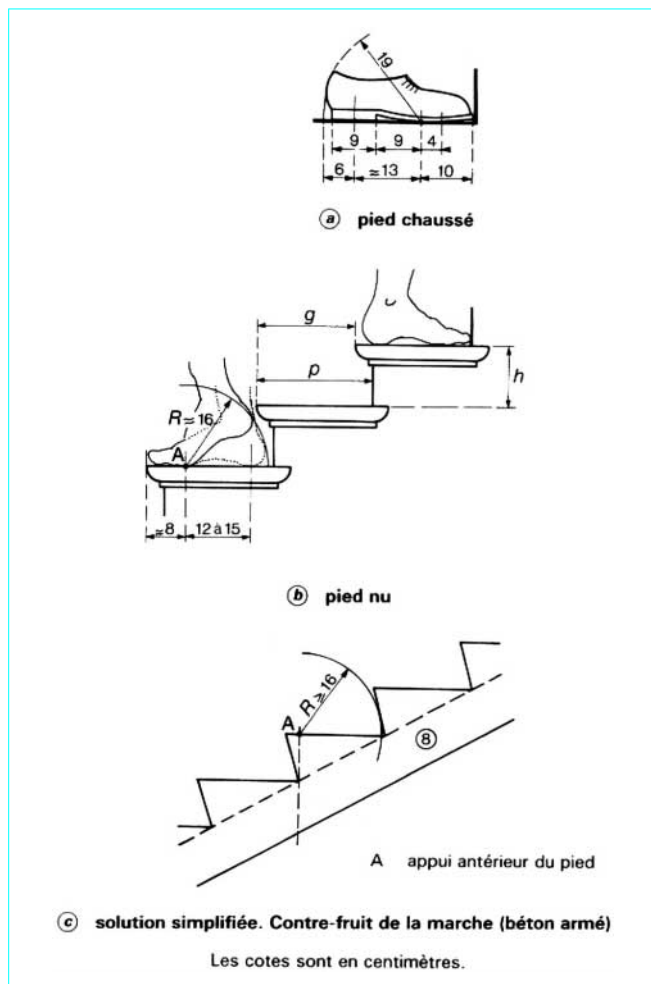


Figure 2 – Marche et nez de marche

Pour *échapper*, il faut n assez grand pour que $nh \approx 2,10 \text{ m} + e$, où e épaisseur de structure est communément de l'ordre de 0,10 m (béton armé) à 0,20 m. Seuls les escaliers en métal, en menuiserie assemblée ou en pierre de taille très dure peuvent avoir une épaisseur plus faible.

Une volée droite est composée de marches rectangulaires dénommées **droites** ou traditionnellement **carrées**, toutes semblables. Au départ ou dans un perron, on peut retourner le bout des marches d'angle en équerre ou par pans coupés (figure 6a). Des marches **courbes** (figure 6d) sont tracées avec un nez toujours perpendiculaire à des lignes de foulée F réelles dont elles dépendent et leur giron ne peut pas être parfaitement régulier le long de toutes les lignes de foulée possibles.

Inversement, des marches **rayonnantes** (figure 6b) ont des nez rectilignes convergeant vers le centre de lignes de foulée circulaires ; elles présentent un collet, partie plus étroite, qui se réduit à quelques centimètres si le noyau est de petit diamètre. Pour l'éviter on peut, s'il n'y a pas de risque, réaliser des marches **dansantes** (figure 6c) dont le nez et la contremarche sont obliques sur la ligne de foulée et non parallèles, alors que dans les marches **biaises** (figure 6c et d), dont l'emploi est spécifiquement baroque, les nez de marche parallèles sont obliques sur l'axe.

Ces dispositions ne peuvent pas être évitées si la volée est courbe. La rampe, qui peut être une main courante (11) (figure 1)

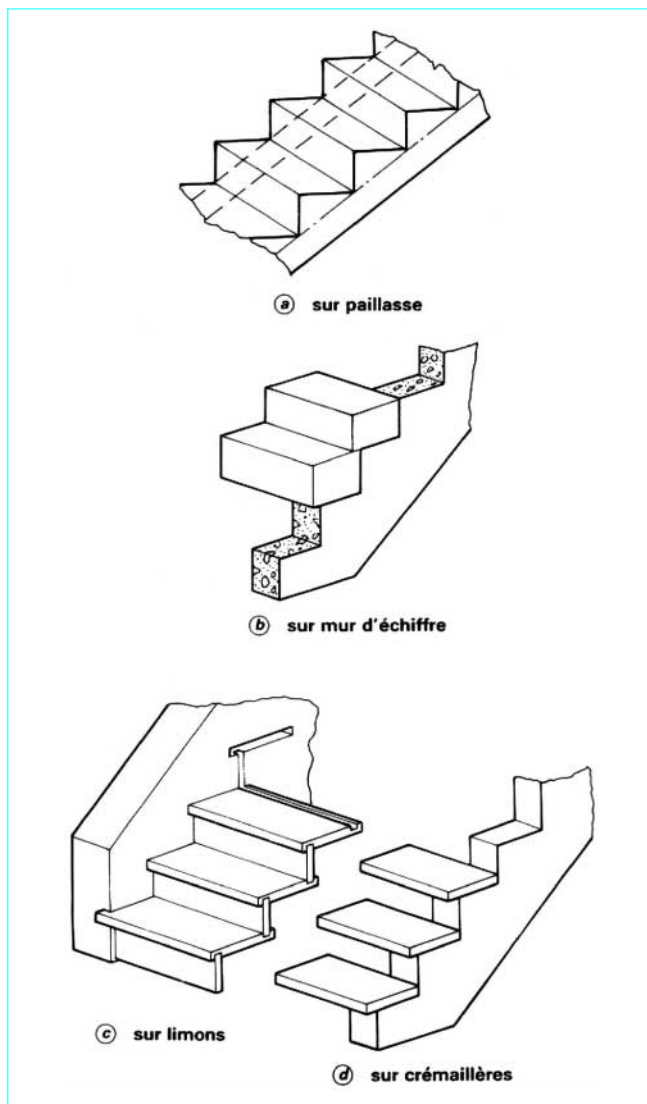


Figure 3 – Dispositions des marches

de garde-corps ou la face supérieure d'un limon, doit être parallèle à la ligne qui joint les nez de marches qui s'y raccordent. Elle présente des **jarrets**, brisures peu élégantes, si la variation de largeur des collets n'est pas régulière.

Le **balancement** est l'étude du tracé des marches qui évite ces jarrets et régularise la forme des marches, ce qui améliore le confort de la circulation.

Toutefois, dès que le projet est utilitaire, on néglige ces raffinements, et si la construction concerne des établissements recevant du public dits ERP, visés par la réglementation spécifique, ces dispositifs sont interdits et les marches d'une volée doivent être toutes semblables, donc droites ou rayonnantes.

La marche de départ (13) (figure 1), première marche d'une volée, peut être intégrée au palier de départ en marche palière, de même que la marche d'arrivée (14) est généralement constituée par la poutre palière qui va d'un mur à l'autre de la cage d'escalier dans les constructions traditionnelles, et fait partie de la charpente (§ 3.5).

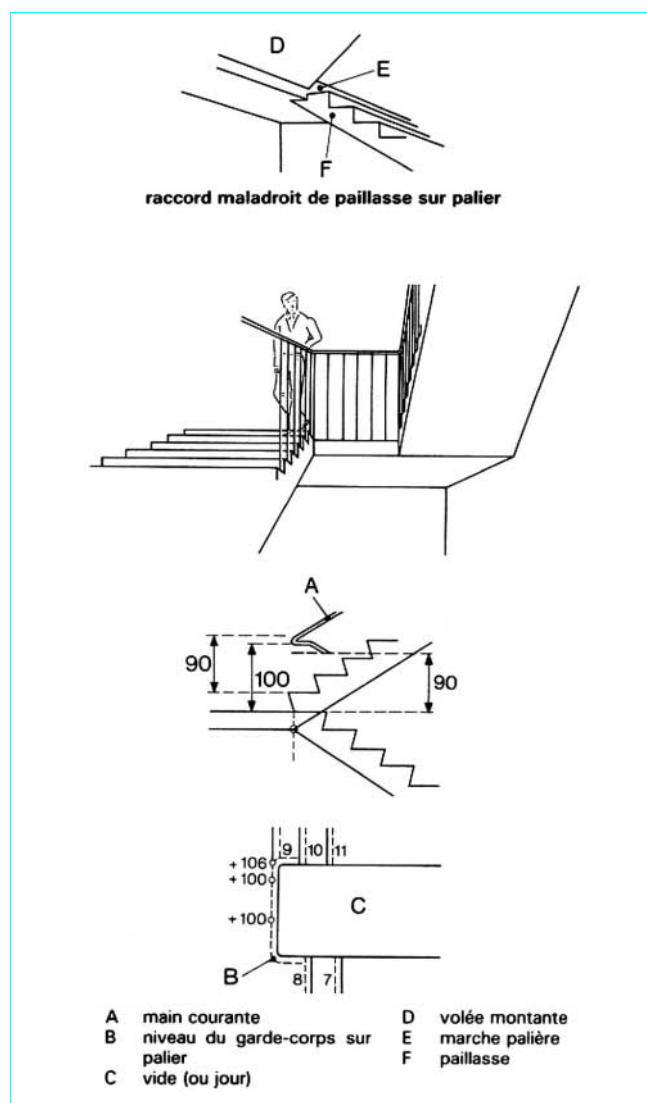


Figure 4 – Raccord sur palier

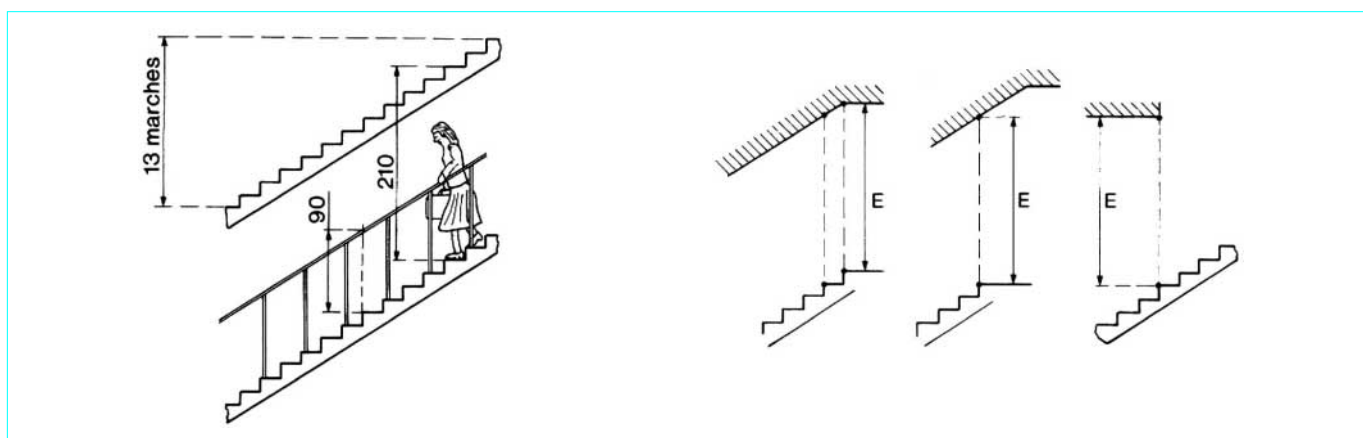


Figure 5 – Échappée E

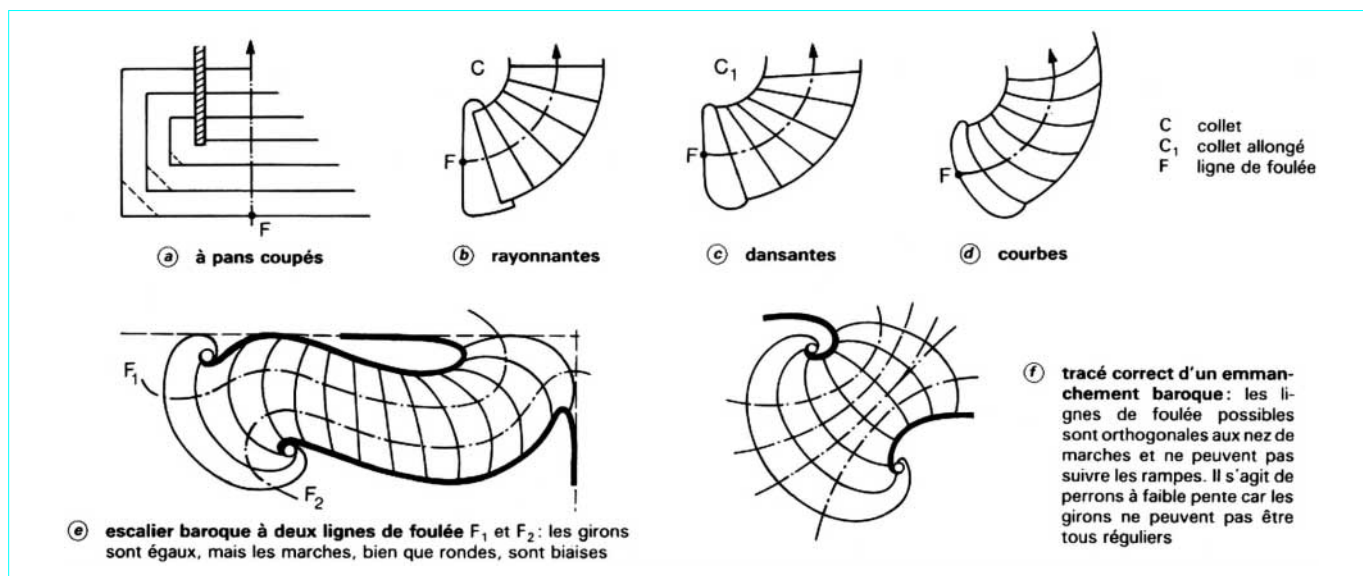


Figure 6 – Marches particulières

La marche de départ et parfois les suivantes peuvent former une sorte de perron avec un tracé spécial (figures 8 et 10a).

2. Circulation et sécurité

L'escalier doit assurer la circulation d'une personne isolée sans difficulté.

2.1 Circulations collectives. Unité de passage. Débit

Vis-à-vis d'une population où l'on ne distingue pas les uns des autres les individus, les circulations s'apprécient en termes de débits. Ceux-ci sont rigoureusement régis par les données dimensionnelles et ergonomiques de la marche humaine.

Marcher n'exige qu'un faible effort physique et la vitesse n'est, en pratique, limitée que par le délai de l'ordre de la seconde qui s'écoule toujours entre la perception que l'on a du sol où va se poser le pied et son appui en sécurité. Cela conditionne les mouvements collectifs. La circulation s'y fait à peu près en files qui se suivent et permettent, sur une largeur de 0,60 m ou **unité de passage**, de voir un peu plus loin que les 0,60 m qui séparent deux personnes. La vitesse de marche reste de l'ordre de 1 m/s et l'on peut contrôler des débits par unité de passage et par minute de 50 à 60 adultes en bonne santé circulant sur un parcours horizontal sans obstacles. Cela corrobore heureusement les notions réglementaires dans lesquelles l'unité de passage varie de 0,60 à 0,80 m (ou davantage s'il faut prévoir des véhicules pour handicapés, ce qui n'est pas le cas des escaliers).

Mais ce délai entre la perception du sol et l'appui du pied va ralentir l'allure dans l'escalier où le pas peut être raccourci à 0,25 m par marche au lieu de 0,60 m à plat car on voit moins bien les marches en descendant en foule, tandis que la fatigue ralentit la montée. La vitesse horizontale en escalier tombe à 0,4 m/s au

mieux, ce qui explique tous les à-coups dans les circulations publiques et les dramatiques accidents en cas de panique : plus la foule est dense, moins on perçoit le sol et plus le mouvement est ralenti. Bien sûr, on peut descendre plus vite dans un escalier dégagé, mais envisager qu'on puisse le faire dans un mouvement de foule est une faute grave.

Si l'on compare néanmoins les débits de l'escalier usuel de 1,40 m de large, ou **deux** unités de passage, à ceux de l'escalier mécanique ou de la batterie d'ascenseurs, on doit toujours reconnaître à cet élément d'architecture classique une bonne efficacité. Il assure sans servitude mécanique un débit continu voisin de 50 personnes par minute, soit autant qu'une unité de passage horizontale. Cela conditionne les durées de mise en place d'un public dans des locaux ou des véhicules.

2.2 Ergonomie de la marche. Formule de Blondel

« La longueur des pas d'une personne qui marche de niveau est communément de deux pieds et la hauteur du pas de celle qui monte à plomb n'est que d'un pied. » (J.F. Blondel).

Si g (giron) est la distance horizontale entre deux pas, ou deux nez de marche successifs, et h la hauteur de la marche, la relation linéaire suivante vérifie cette donnée ergonomique expérimentale, où le pied vaut environ 0,32 m :

$$g + 2 h \approx 0,64 \text{ m}$$

Cette égalité n'a rien de mathématique et le pied choisi, comme l'intervalle entre les barreaux d'échelles, se réduit à 0,30 m dans les petits escaliers où :

$$g + 2 h = 0,60 \text{ m}$$

En République fédérale d'Allemagne, on admet souvent comme loi ergonomique :

$$g + h \approx 0,41 \text{ m}$$

Ces deux règles coïncident pour des petits escaliers raides où :

$$0,19 \leq h \leq 0,23 \text{ m et } 0,22 \geq g \geq 0,20 \text{ m}$$

On préfère en France :

$$0,16 \leq h \leq 0,17 \text{ m et } 0,29 \geq g \geq 0,26 \text{ m}$$

La réglementation des établissements recevant du public (§ 5.2) impose en général :

$$0,13 \leq h \leq 0,17 \text{ m et } 0,36 > g > 0,28 \text{ m}$$

la formule de Blondel étant respectée.

Dans des volées courbes à marches rayonnantes $g \leq 0,42 \text{ m}$, ce qui impose le tracé de la figure 7.

L'ergonomie permet de trouver des relations entre la marche normale, la longueur des pas et la fatigue correspondante, et une mesure de l'effort fourni en montant à une vitesse qui ne change pas trop le rythme du pas dont la longueur est raccourcie et ramenée au giron des marches. Toutefois, élever 70 kg à 0,2 m/s exige évidemment une dépense mécanique de 140 W alors que la marche au même rythme, qui correspond à la vitesse de 1 m/s, n'exige que 30 W.

La règle de Blondel est consciemment transgressée dans certaines recherches monumentales. Mais en général il faut la respecter, et particulièrement si la hauteur des marches varie légèrement comme il est bon de le faire au départ d'un escalier pour adoucir le passage de la circulation horizontale à la montée (figure 8).

2.3 Applications : échappée en plan et paliers

Pour échapper (§ 1.3), il faut avoir parcouru verticalement 2,20 m environ.

Si $h \approx 0,17 \text{ m}$, il faut au moins : $n \geq 220/17 \approx 13$ hauteurs de marches par volée. La pente est alors de $17/26 \approx 2/3$ au moins, et de $17/29 \approx 4/7$ au plus, soit en moyenne $3/5$ et l'escalier est plutôt raide (pente $> 1/2$).

Dans des escaliers monumentaux : $n \geq 230/13 \approx 18$ hauteurs de marches et la pente est douce, de l'ordre de $1/3$ (§ 6.3).

Il faut aussi penser, si un palier est intercalé entre deux volées, que le pas s'allonge de g (giron) à 60 ou 65 cm. Le tracé d'un palier intermédiaire doit donc être fait suivant les cotes de la figure 9, sinon l'escalier est inconfortable ou même dangereux. Les règlements qui imposent sans nuance des cotes de paliers (1 m) doivent être contestés.

2.4 Conditions de confort et de sécurité des usagers. Éclairage. Accès

On a toujours insisté sur les conditions d'éclairage naturel de l'escalier. On peut les résumer en ce que tous les nez de marche doivent être éclairés de façon assez régulière et sans contre-jour avec une intensité au moins égale à l'éclairage des accès immédiats.

La bonne solution dépend évidemment de chaque cas particulier, mais l'éclairage zénithal ne convient qu'à des escaliers à très grand vide central ou ne montant qu'un étage. L'éclairage artificiel a les mêmes obligations qu'on ne peut jamais perdre de vue sans nuire à la sécurité de la circulation. On doit éviter toute source lumineuse en fond de palier : elle éblouit à contre-jour.

L'accès dans un escalier concerne évidemment le rez-de-chaussée mais aussi chaque étage sous deux aspects opposés : on doit parvenir facilement à l'escalier mais on ne doit pouvoir y provoquer aucune bousculade indésirable. En particulier les portes d'accès, s'il y en a, ne doivent jamais débatter dans les files de circulation correspondant aux lignes de foulée possibles.

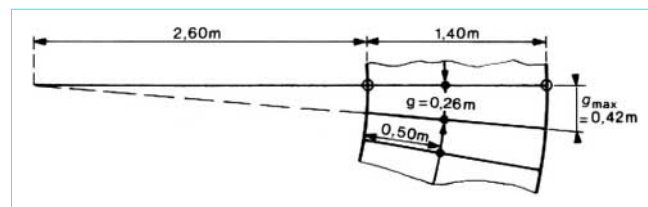


Figure 7 – Escalier circulaire normal à deux unités de passage
(Ø extérieur = 8,40 m)

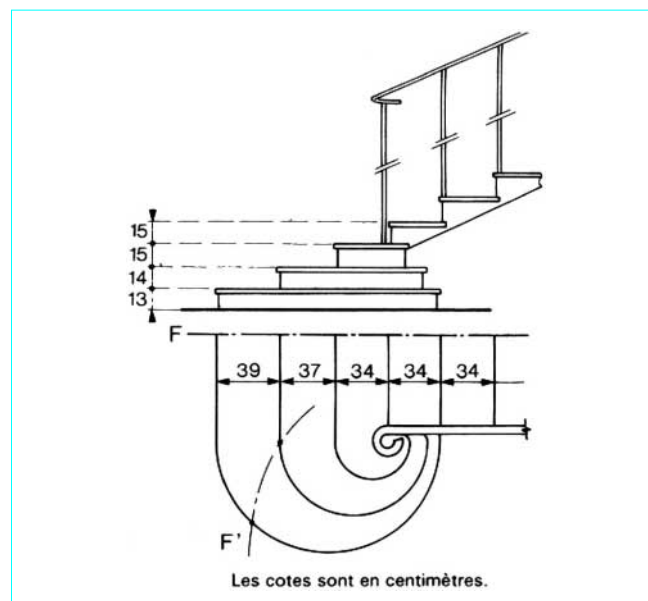


Figure 8 – Départ progressif d'escalier classique à volute

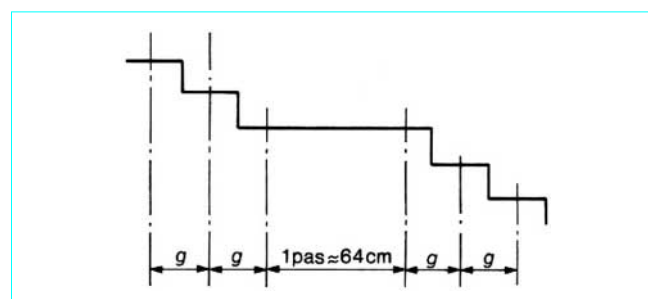


Figure 9 – Palier intermédiaire

2.5 Sécurité du public vis-à-vis des risques d'incendie

Dans tous les pays civilisés s'est développée une réglementation qui permet de contrôler qu'un projet ou une réalisation respectent des dispositions définies pour limiter les risques encourus par les occupants, notamment en cas d'incendie.

En France, un décret du 13 août 1954 a inauguré une série de textes constamment mis à jour en fonction de l'évolution technique. Ces décrets (23.3.1965, 15.11.1967, 31.10.1973, etc.) donnent force de loi à des règlements promulgués sous forme d'arrêtés dont une dizaine s'échelonnant de 1980 à 1985 sont applicables en 1986, la préparation des suivants étant en cours.

Il n'est donc pas question d'en faire un résumé qui ne peut pas être à jour, et tout contrôle doit se faire à partir des textes officiels rassemblés dans les brochures éditées par les Journaux officiels (notamment, à ce jour, brochure 1477).

Les principes, par contre, ne changent pas plus que les lois de la physique qui régissent les phénomènes. Ils concernent d'abord les dimensions des passages, telles qu'elles sont indiquées à partir des données ergonomiques.

Ensuite, le choix des matériaux est limité en fonction de leur comportement au feu caractérisé par des essais conventionnels.

Enfin, les conditions de ventilation sont précisées pour que l'atmosphère des issues soit respirable, car dans un incendie c'est le risque d'asphyxie qui est de beaucoup le plus grand.

2.6 Ventilation des escaliers

Hors le risque d'incendie, on sait par expérience que les odeurs du rez-de-chaussée s'engouffrent dans un escalier qui est physiquement une cheminée. La dépression par rapport à l'extérieur s'y établit à un niveau de l'ordre de :

$$\Delta p = 0,04 H \cdot \Delta \theta$$

avec Δp en Pa, H en m et $\Delta \theta$ différence de température entre l'extérieur et la cage d'escalier en K.

Les vitesses induites sont de plusieurs mètres par seconde en hiver, puisque, si $H = 25$ m et $\Delta \theta = 20$ K, $\Delta p = 20$ Pa, ce qui en outre appliqué à un vantail de porte de 2 m^2 une charge de 40 N qui n'est équilibré par le ferme-porte que si l'entrebâillement laisse passer un débit d'air de l'ordre de $1 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, ce qui interdit tout contrôle des conditions de confort et postule des dispositifs avec sas pour y parvenir.

On peut utilement rappeler qu'un sas est constitué de deux portes successives dont l'une ne peut s'ouvrir que si l'autre est fermée, interdisant toute communication entre les atmosphères de part et d'autre.

En première approximation, avec $\Delta \theta \approx 50$ K, la formule ci-avant permet de chiffrer le phénomène dans un IGH (immeuble de grande hauteur) où le risque est une entrée d'air depuis un étage accidentellement enfumé. Le dispositif de ventilation du sas doit être assez puissant pour empêcher tout appel d'air vers la cage d'escalier : les débits en sont de plusieurs mètres cubes par seconde. C'est dès l'avant-projet, et non pas après un contrôle exact donc tardif, qu'il faut prévoir les gaines correspondantes.

3. Principes de construction

On pourrait exposer la construction de l'escalier dans l'ordre du chantier, en partant des fondations jusqu'aux revêtements et aux peintures. Cela convient au contrôle du projet et à la rédaction d'un descriptif de routine, mais n'aide en rien la conception. Celle-ci est d'abord invention d'une forme et ensuite seulement contrôles de stabilité et d'ambiance qui doivent respecter l'aspect recherché.

3.1 Formes et stabilité. Conception globale

L'escalier est, par tradition, un chef-d'œuvre artisanal. La technologie raffinée des détails fait trop souvent perdre de vue que la stabilité correspond d'abord à un schéma d'ensemble qui articule entre eux les éléments.

On peut ramener les schémas à trois : perron, échelle, hélice (figure 10).

Le **perron** est une construction massive, sans report de charge, toute la masse posée directement sur une fondation. L'archéologie conduit à y assimiler beaucoup d'escaliers anciens et l'on en fait toujours en extérieur, mais aussi dans bien des volées courtes intérieures simplement posées sur un plancher.

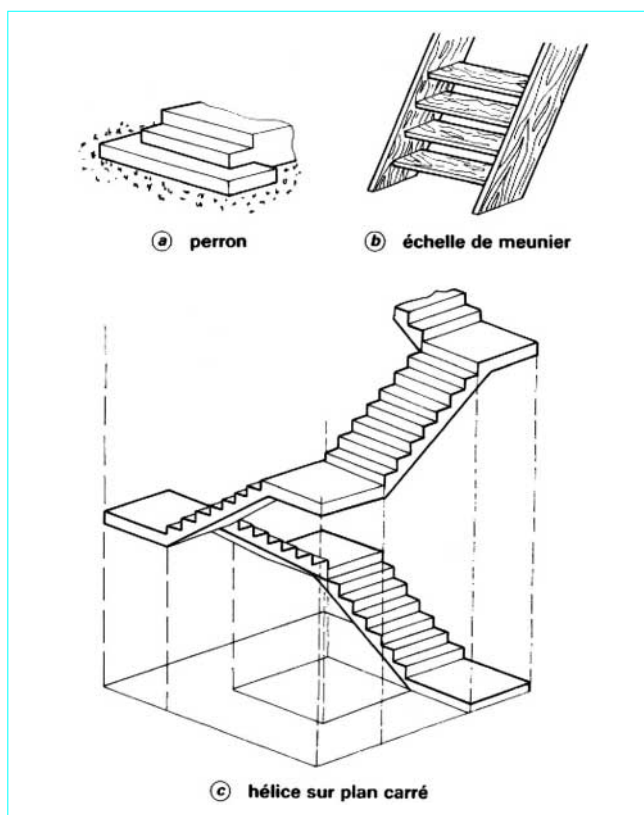


Figure 10 - Formes et conception

L'**échelle** correspond à la volée élémentaire du plus grand nombre des escaliers actuels, si ancienne qu'elle soit. La conception dépend d'abord de celle des marches qu'elle porte et qui conditionnent l'ossature qui devra reporter leur charge aux paliers.

En dehors de l'hypothèse simplificatrice qui suppose les appuis parfaitement articulés et ne transmettant que des efforts faciles à analyser et à l'exclusion des escaliers droits, tout angle dans le tracé fait d'un escalier monolithe une **hélice** travaillant en torsion comme un ressort.

3.2 Marches

Structuralement, tous les systèmes possibles se limitent à quatre (figure 11).

3.2.1 Marche portée

C'est une simple surcharge posée sur un support continu : de nos jours une dalle en pente ou pailasse, généralement en béton armé. L'escalier en **voûte sarrazine** en briques creuses hourdées au plâtre est apparenté aux escaliers dont les marches souvent associées à des voûtes appareillées étaient dites à *repos*, la supérieure portant sur l'inférieure. Il se fait encore et reste un bon ouvrage artisanal de conception intuitive et de prix modéré.

3.2.2 Marche à repos proprement dite

Elle repose par ses deux extrémités sans porte-à-faux, en général sur des limons. Si les limons se transforment en crémaillère sans changement de place, la structure est bien sûr inchangée. La marche est alors équivalente à une solive.

3.2.3 Marche en porte-à-faux

Si les crémaillères se rapprochent et à la limite se confondent dans la partie centrale vers la ligne de foulée, l'appui des marches y développe des torsions locales qui s'ajoutent aux actions d'ensemble. La marche en elle-même est une double console soumise à des charges linéiques assez variables en position, sinon en grandeur (de 0 à 4 kN, les Règles BAEL proposent 5,5 kN par mètre de marche).

3.2.4 Marche en console

Existant dès l'antiquité et toujours pratiquée artisanalement pour de petits escaliers où les marches sont simplement encastrées dans le mur, c'est une solution qui se prête à des effets monumentaux. Les actions limites de torsion sont forcément plus importantes que dans le cas précédent, mais elles sont toujours dans le même sens. Analysées qualitativement au siècle dernier, leur prise en compte par le calcul est désormais usuel.

3.2.5 Charges et actions

Conventionnellement selon la norme NF P 06-001, sous réserve des règles qui s'appliquent dans chaque cas particulier, les actions sont équivalentes à des surcharges statiques de 400 ou de 500 kg/m², soit des actions de 4 ou 5 kN. En fait, cette application à l'unité de surface n'a guère de sens et une charge statique de l'ordre de 4 kN sur chaque marche, à chaque ligne de foulée possible, est plus près de la réalité. Comme elle correspond à l'action dynamique du piéton, soit 1 kN environ appliqué avec la vitesse initiale de 0,5 m/s à la descente et supprimée au pas suivant après 0,5 s, ce qui provoque une sollicitation périodique dès que plusieurs personnes se suivent, on peut apprécier à quel point la prise en compte d'actions réelles peut présenter davantage d'intérêt vis-à-vis des résonances qui peuvent être à craindre dans certains escaliers monumentaux. Inversement, il est bien certain que le calcul statique suffit dans les escaliers usuels dont la portée n'excède pas 2,50 m entre paliers.

3.3 Volée

Il n'y a que trois types de supports de volée, quatre si l'on compte les voûtes de forme courbe qui ne se font plus guère.

3.3.1 Limons

Ce sont des poutres calculées comme telles en tenant compte, s'il y a lieu, des dénivelés d'appuis. Dans les constructions en charpente traditionnelle, aucun effort d'encastrement des marches n'était possible et les plateaux à repos portaient en appui simple sur les mortaises et entailles, ne donnant qu'un aspect d'encastrement. En construction plus rigide, d'acier ou de béton armé, les actions de torsion dues aux dissymétries restent mineures et sont négligeables dans les ouvrages usuels.

3.3.2 Crémaillères

Ce sont aussi des poutres et, placées en bout de marche, elles n'ont avec le limon que la différence de leur forme qui limite leur hauteur efficace au creux de marche [cote (8), figure 1]. En réalisation contemporaine, les dents de la crémaillère sont toujours rapportées et l'on ne va plus guère entailler des pièces de bois de grosse section pour y assembler les marches.

Par contre, la crémaillère est souvent baptisée limon, en ne considérant que sa partie efficace et en comptant les dents pour des échantignolles rapportées, ce qu'elles sont en effet. Elle est alors souvent rapprochée du centre de la marche en porte-à-faux et travaille toujours en torsion, ce qui complique son calcul et conduit à rapprocher d'un carré sa section qui est en général tubulaire, donc en métal.

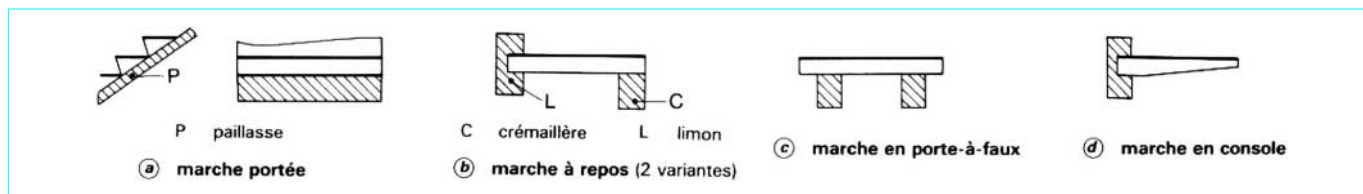


Figure 11 – Types de marches

3.3.3 Paillasses

Ces dalles inclinées posent d'autant moins de problèmes que les surcharges variables usuelles de 4 ou 5 kN par mètre carré y sont amorties par la charge permanente due aux marches portées qui est équivalente à 8 cm de béton légèrement armé (marches de 16 cm), soit 2 kN par mètre carré. Leur portée peut néanmoins être assez importante : elle atteint facilement 5 à 6 m pour des volées longues et les charges sur les poutres palières sont alors de l'ordre de 40 kN par mètre de largeur de paillasse. L'action de telles paillasses sur les poutres ou dalles palières est celle d'une dalle de grande portée qui provoque donc des torsions sensibles, alors qu'elles restent négligeables dans les ouvrages usuels.

3.3.4 Voûtes et coques

Sans prétendre imposer le calcul aux voûtes en pierre dont on a toujours analysé empiriquement la stabilité sans aucun chiffre (Arnaud), ni aux voûtes sarrazines, on peut envisager des formes d'escaliers, de grandes hélices en particulier, où des voiles et coques exigent des calculs élaborés ; mais en général ce ne sont plus de simples volées.

3.4 Repos des volées : les paliers

Traditionnellement, les paliers sont des poutres droites : la marche palière portant d'un mur à l'autre dans la cage. Comme la charge que lui imposent les limons est très dissymétrique, il est rare que cette poutre palière ne justifie pas un contrôle de torsion et sa forme logique est assez carrée. Si l'escalier est sur paillasse (figure 12) et non sur charpente, on continue en général la construction par éléments plans jusqu'au fond du palier, formant alors une poutre en Z avec deux paliers et la volée qui les joint, et les appuis sur les murs se font principalement en fond de cage.

Si, par contre, les volées sont *courbes*, les actions de torsion des limons hélicoïdaux doivent être absorbées par les poutres palières qui deviennent des pièces de charpente complexes selon l'analyse précisée au paragraphe 3.6.

3.5 Cage d'escalier

On parle volontiers d'escaliers libres, exposant sous tous les angles leur forme dans le vide d'un grand volume sous la trémie ouverte dans un plancher et on les définit souvent comme n'ayant pas de cage : c'est une erreur. Certes, ils peuvent ne pas être encloisonnés (figure 13), mais leur poids propre, les surcharges qu'ils supportent et les actions complexes qu'ils imposent à leur repos doivent, bien autant du palier supérieur que de leur base, être ramenés jusqu'à la fondation du bâtiment ! Que ce soit près ou loin, il faudra toujours analyser la charpente complète des paliers ou planchers de repos et le report des actions sur des poteaux ou des murs : ce n'est pas toujours simple et les dimensionnements des poutres de torsion et des appuis d'encastrement sur des poteaux éloignés peuvent être gênants, d'autant plus qu'un escalier libre a beaucoup plus vocation à être une sculpture qu'une charpente ordinaire.

On peut alors parler de *déport* de la charpente de cage dans un but monumental. On doit, s'il est encloisonné, parler de *clôture* de la cage avec ses fonctions propres indépendamment de la structure avec laquelle elle se confondait dans la tradition des maçons.

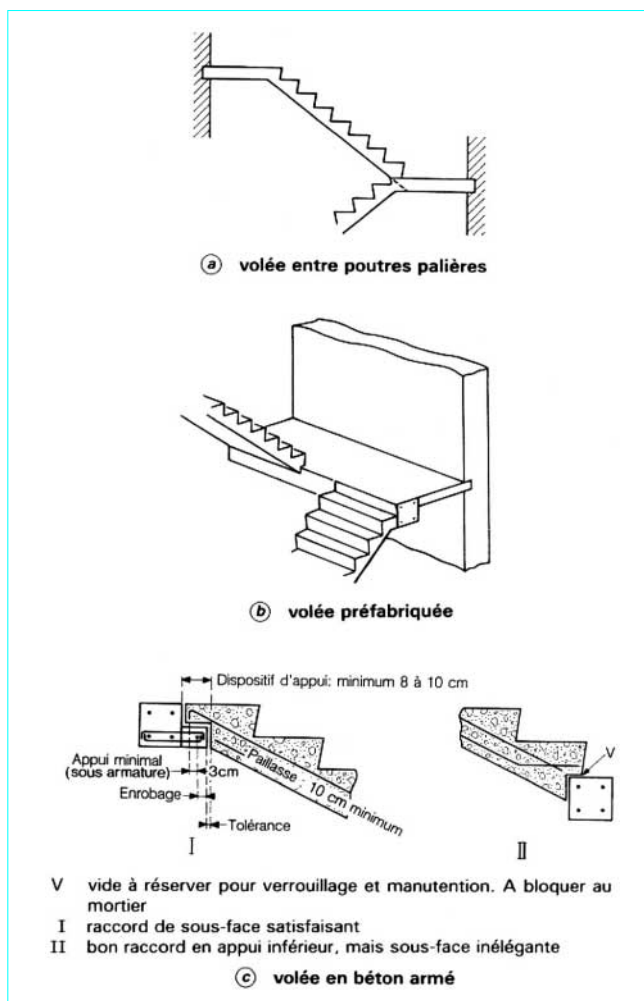


Figure 12 - Repos des volées

3.6 Hélices : fonction, stabilité et problèmes de calcul

Un escalier est une hélice. Les exemples classiques s'y réfèrent presque tous. Sa fonction l'oblige à réaliser une relation entre une entrée, à rez-de-chaussée en général, et un point d'accès à l'étage. Il n'y a que deux solutions. Dans la première, on continue par une rampe dans la direction où l'on marche, ce qui constitue un escalier droit guidé et porté entre deux murs. S'il n'est pas toujours monumental, il est toujours sévère. Dans la seconde, le mouvement tourne en plan et, comme il monte, c'est une hélice. Son plan est quelconque : circulaire, carré ou polygonal et, selon la pente et la place disponible en plan, la révolution est plus ou moins complète. S'il y a plusieurs étages superposés, les spires de l'hélice s'articulent les unes au-dessus des autres.

Dans les anciennes constructions les plus simples, et jusqu'au XVIII^e siècle, on a pratiquement porté les escaliers sur des murs plus ou moins élégés en portique ou en arcades. Si les marches étaient trop longues pour être posées sur les murs, on les a *reposées* sur des voûtes entre ces murs qui, pour en absorber la poussée, devaient être épais. L'exemple classique de l'escalier Henri II du Louvre donne l'échelle d'une telle réalisation où les volées, comme les voûtes montant alternativement en se retournant, réalisent

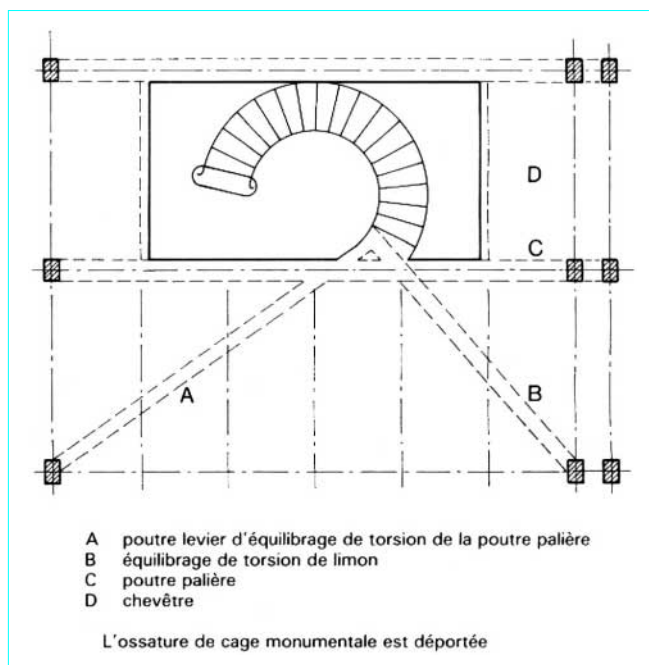


Figure 13 – Escalier libre

finalement le schéma de l'hélice. À plus petite échelle, il est devenu le *colimaçon*, passage intérieur de la coquille couverte en tore hélicoïdal dans l'élégante vis Saint-Gilles. Aucune de ces constructions n'a jamais été calculée et les épures de taille de pierre étaient déjà assez compliquées pour exiger toute l'attention des exécutants et provoquer l'admiration. Il n'est plus guère question d'en réaliser mais certaines réfections justifient encore l'attention des spécialistes qui disposent, pour les tracés, des raffinements de la géométrie descriptive. On peut avoir à en réparer et rétablir leur qualité après des siècles d'usage.

L'escalier s'est aéré au XVIII^e siècle et la vis, hélice libre au centre, sans noyau, est devenue le prototype de tous les beaux escaliers. L'escalier dans la cage à la française (figure 14) monte un étage le long de trois côtés d'un grand vestibule où le palier dessert deux ailes de part et d'autre le long de la façade : la beauté, l'éclairage, les circulations y sont parfaits. Ce sont les charpentiers qui, reprenant le même modèle en moins grand, l'ont opposé au modèle à l'anglaise où les crémaillères sont visibles et non cachées par un limon. Depuis, on raffine sur le dessin des courbes vues avec les tracés de balancement réservés aux escaliers privés (§ 6.2) et l'on a développé les principes de stabilité. Mais les premiers escaliers en béton armé, rue Danton (réalisé par Édouard Arnaud) ou rue Raynouard (réalisé par Auguste Perret), n'étaient pas plus calculés il y a seulement quelques dizaines d'années que ne l'étaient les escaliers en pierre. Ils tiennent toujours : en effet, ces escaliers faits pour le décor et non pour un usage industriel ne subissent guère que leur poids propre et l'adaptation des matériaux qui concerne leur masse, mineure dans l'ensemble du bâtiment, conduit généralement à une stabilité durable.

S'il faut concevoir actuellement des formes analogues, il est bon d'explicitier le schéma statique pour orienter raisonnablement le calcul de contrôle de la stabilité.

On perçoit toujours des actions de torsion. Dans les constructions en pierre, chaque marche équilibre par une torsion à l'encastrement dans le mur la relative élasticité du limon suspendu. Dans les charpentes en bois, la plasticité du matériau le rend apte à des adaptations importantes et produit des déformations très

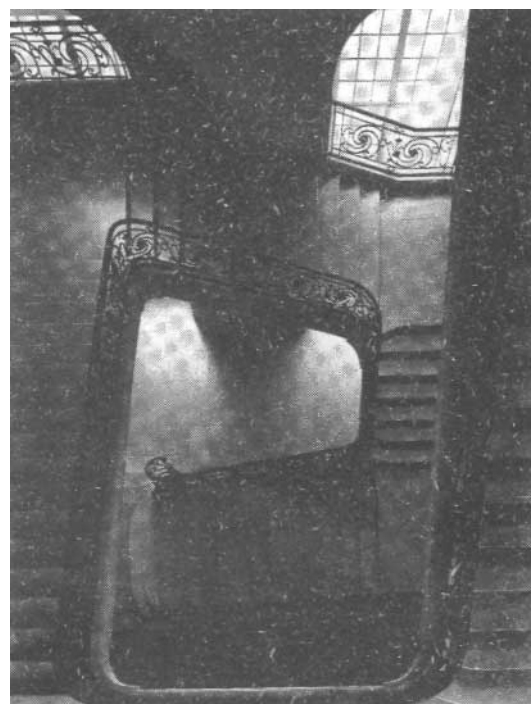


Figure 14 – Escalier dans une cage à la française

(Abbaye aux hommes à Caen. Photographie de Y. Leclerc)

perceptibles. En béton armé et en charpente métallique, le calcul doit en tenir compte.

Dans des escaliers à limon hélicoïdal dont le jour a un assez petit diamètre, c'est la butée de l'ensemble par le mur périphérique qui contribue à amortir la torsion. Elle reste la sollicitation principale du noyau d'une petite vis. Il n'y a donc aucun intérêt à le réduire, outre le fait que le collet trop étroit des marches ne peut servir à rien.

Si la vis est sur plan angulaire, les actions de torsion se concentrent aux assemblages des angles, notamment aux appuis des limons sur les poutres palières et d'autant plus si les palières sont en angle et non droits. Un chef-d'œuvre en ce domaine est l'escalier à limons et potelets de 1860-1900 qui peut encore se construire et qu'on doit savoir réparer. Le schéma de la figure 15 correspond globalement à équilibrer par des poussées sur les angles de la cage la torsion du limon hélicoïdal sur plan carré, torsion qui se transmet en majeure partie par celle de ses composantes qui provoque la compression des éléments rectilignes. Mais un certain encastrement des potelets dans les butées palières est indispensable pour équilibrer les flexions résiduelles dues aux moments de torsion dans les limons.

La charge verticale totale portée par tous les limons de tous les étages se concentre sur le potelet de départ puisque les palières d'étage n'équilibrent que des actions horizontales.

On a réalisé depuis 1950 de nombreux escaliers métalliques *libres* qui suggèrent immédiatement le limon hélicoïdal et seul le calcul a pu convaincre les exécutants des premiers projets (L.K. Wilenko, 1949). Actuellement, on préfère encore réaliser un modèle à échelle assez grande pour légitimer des calculs rigoureux de similitude mécanique qui permettent de transposer en toute sécurité d'esprit les résultats d'essais poussés souvent jusqu'à la rupture.

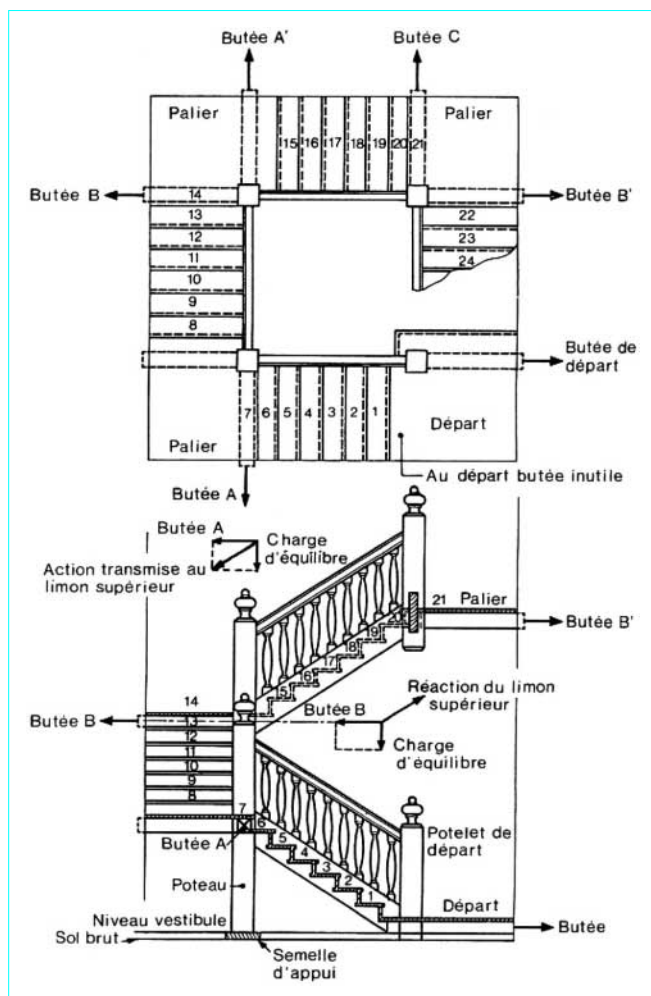


Figure 15 – Escalier à limons et potelets

4. Éléments de finition et confort

4.1 Garde-corps et mains courantes

Rampes, balustrades et mains courantes sont les éléments du garde-corps destinés à éviter les chutes dans un vide éventuel. Certains pays, telle la République fédérale d'Allemagne, interdisent les jours où la chute peut se poursuivre sans obstacle jusqu'au sol : c'est brutal, mais les normes sur les garde-corps sont rigoureuses, ce qui est raisonnable (NF P 01-012) ; la variété des dessins possibles reste heureusement quasi infinie sous réserve du contrôle de chacun vis-à-vis du texte légal dont l'essentiel se ramène à la figure 16.

La main courante, guide et appui, est obligatoirement parallèle à la ligne qui joint les nez de marches, les surplombant de 90 cm. En pente, on l'appelle encore **rampe**.

Son rôle de main courante est fondamental pour guider le pas en descendant l'escalier dans la mesure où l'on voit mal les marches (§ 2.1 et 2.3). La main posée sur la rampe, 40 cm en avant du corps,

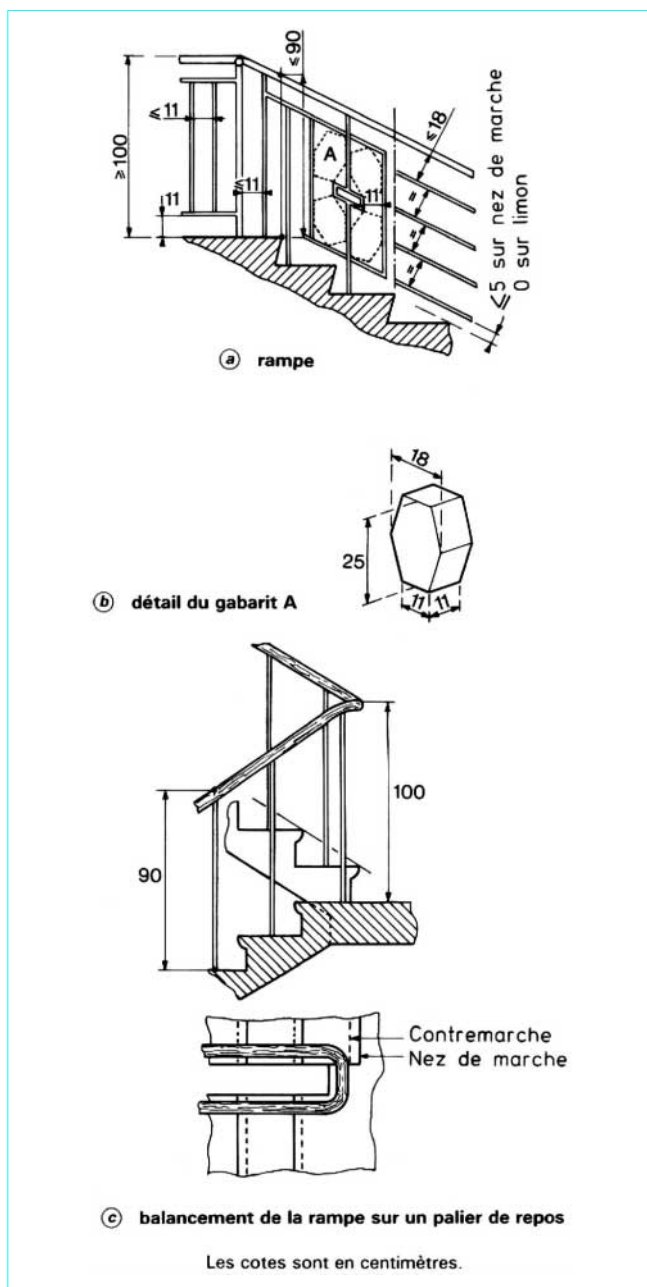


Figure 16 – Rampe d'escalier selon NF P 01-012

donc à l'aplomb de la deuxième marche, perçoit avec le délai nécessaire le mouvement de l'escalier. Tout le monde a expérimenté l'augmentation considérable de la vitesse de descente possible en se guidant sur la rampe d'un escalier bien tracé et, inversement, la lenteur imposée si les marches ne sont pas visibles et la rampe inaccessible. Quant aux divergences entre les deux, elles provoquent des accidents et doivent être absolument évitées.

Ce tracé de la rampe est la première origine du balancement du fait qu'elle est parallèle au limon s'il existe. Il est compliqué parce que la hauteur de l'horizontale au droit des paliers doit être de 1 m. Cette hauteur peut parfois être augmentée pour accroître la sécurité, comme dans les écoles.

La rampe est supportée par des **balustres** verticaux, plus ou moins sculptés, parfois reliés par des lisses rampantes ou horizontales. Les **vides** restants sont limités par les règles de sécurité, larges de 11 cm au plus s'ils sont longs. S'ils sont de forme plus élaborée, ils ne doivent pas permettre le passage d'un gabarit de contrôle qui peut varier d'un pays à l'autre en restant de l'ordre de 18 × 24 cm (figure 16b).

La fixation de cet ensemble formant balustrade se fait sur les marches, sur les paillasse ou sur les limons selon les cas. Elle doit résister à des efforts horizontaux pris conventionnellement de l'ordre de 1 kN, le contrôle se référant toujours à la lettre de la norme (NF P 01-012 et P 06-001). La résistance est, en fait, en bonne partie assurée par des actions hélicoïdales beaucoup plus efficaces que la flexion de balustres ou surtout de barreaux minces : le pilastre de départ peut être le seul solidement encastré même dans des escaliers à plusieurs étages.

Les mains courantes les plus agréables au toucher sont en bois poli quelle que soit leur forme. Métalliques, elles sont actuellement revêtues de profilés en polychlorure de vinyle.

4.2 Revêtement des marches

Pour ne pas s'user trop vite aux lignes de foulée, ce qui les déforme et les polit aux dépens de la sécurité, les marches ont longtemps été de pierre dure à gros grain (lave et granit). Le marbre, très séduisant, est glissant en intérieur ; les intempéries le dépolissent régulièrement en extérieur.

Le fil du bois doit être parallèle aux nez. Le métal doit comporter des reliefs, généralement formés par laminage de tôles spéciales (larmes, losanges).

Depuis longtemps, on substitue aux marches massives, elles-mêmes remplaçables, si elles sont portées, de simples **semelles** moins épaisses posées à la surface d'une forme en maçonnerie. En pierre, elles ont au moins 4 cm. Des carrelages céramiques à relief antidérapants sont actuellement très employés dans la tradition ancienne où les nez de marche étaient seuls en bois dur et les fonds maçonnés.

Ces surfaces dures sont bruyantes. Sauf dans les escaliers qui doivent être strictement incombustibles, on apprécie les revêtements insonores, et d'abord la moquette de laine qui procure un confort de marche plus grand, surtout à la descente où le talon porte durement. Elle est peu inflammable.

Des revêtements de caoutchouc sont agréables et durables ; leurs compositions sont nombreuses : avec reliefs de surface, avec sous-couche en mousse ou massifs quasiment incombustibles grâce à des charges judicieuses. C'est le cas des revêtements en tapis plastiques, surtout vinyliques, moins résistants en général.

Le nez de marche, particulièrement sollicité, fait l'objet d'un traitement antidérapant spécial dans presque tous les escaliers collectifs. Il comporte au moins un profil en caoutchouc dur strié sur les tapis collés auxquels il s'adapte. Les marches en pierre dure sont striées à la meule. Les marches en bois reçoivent un nez métallique.

4.3 Entretien. Électricité statique

Les marches doivent pouvoir être nettoyées. En matériaux durs elles sont lavées, mais c'est une opération qui exige un contrôle de la compatibilité des produits d'entretien avec les matériaux (article *Pierres de construction* [C 901] dans ce traité). Les sols en caoutchouc sont fragiles vis-à-vis des détersifs et l'eau de Javel, à laquelle le bois résiste, ruine en quelques années certaines céramiques.

Le profil des marches doit être conçu en conséquence, s'il y a lieu avec des becquets et des relevés, et des escaliers à l'anglaise lavés à grande eau sont souvent tachés sur les retours de crémaillères peu accessibles. Par contre, les coins des escaliers à la française entre les contremarches et les murs ou les limons sont difficiles à balayer à sec. On a donc, dans les constructions bien entretenues, gardé longtemps un faible pour les escaliers en bois à l'anglaise : la poussière était facilement chassée du haut en bas par le vide central.

L'époussetage des rampes et balustrades est souvent compliqué par des phénomènes électrostatiques : la poussière colle sur les surfaces non conductrices et même sur la peinture, car les charges électriques s'y accumulent par le simple frottement de l'air qui s'élève en hiver dans les cages.

Ces charges électriques sont collectées sur le corps des usagers par la main qui se guide à la rampe (dont trois volées de profilé vinylique ont une capacité comparable à celle d'un homme isolé par de bonnes semelles de caoutchouc en air sec). Dans ces conditions, la tension dépasse largement 10 000 V, mais l'énergie stockée reste de l'ordre de 10^{-3} J, car un électrophore n'est pas un condensateur. Le choc de la décharge est très sensible, d'aucuns disent douloureux et c'est vrai au creux de la main. Pour l'éviter, il suffit de faire attention en touchant une pièce métallique où se portera l'étincelle dont la puissance n'excède pas quelques watts, ce qui ne présente évidemment aucun danger.

On peut le contrôler selon la norme NF C 15-100, la durée de décharge restant inférieure à la nanoseconde, mais le Bureau international du travail avait confirmé cette absence de risque dès 1962.

Seul, dans l'escalier, reste le risque de chute, en général en glissant sur un revêtement de sol mal choisi ou en mauvais état.

4.4 Clôture et aspect

Un escalier libre est en lui-même un objet sculpté. Son seul décor est celui du local forcément monumental où il se développe.

Le décor propre d'un escalier suppose qu'il est encloué dans une cage, selon la conception traditionnelle.

Techniquement, la cage a d'abord un rôle de stabilité et l'on peut parfois avoir à préciser cette stabilité au vent ou aux séismes en cas d'écroulement des corps de bâtiments adjacents. Elle a surtout un rôle de protection contre l'incendie. Cela ne présente guère de difficultés, l'aggloméré de plâtre de 7 cm assurant par lui-même un degré coupe-feu de 2 h pour un encombrement minimal. Il convient de contrôler la résistance au feu de la charpente (article *Sécurité contre l'incendie* [C 3 280] [C 3 282] [C 3 283] dans ce traité).

Traditionnellement, le décor de la cage d'escalier était représentatif du caractère du bâtiment, tous les monuments de Paris et d'ailleurs en témoignent. Actuellement, la tendance est de réserver le décor à des éléments de réception et il est rare de traiter dans cet esprit un escalier encloué. Celui-ci est donc généralement utilitaire et d'une grande sobriété.

Le besoin d'éclairage exige des couleurs claires, en particulier sous les rampants. Mais à hauteur d'appui, malgré les rampes, les traces de main supposent une protection que seuls peuvent assurer en général des revêtements collés, souvent vinyliques, faciles à laver. Leur support doit être dur pour résister au choc inévitable d'objets encombrants qu'on est parfois amené à manutentionner à la main, surtout en habitation où il n'existe pas de monte-charge à grand gabarit. L'enduit de ciment lissé est donc préférable au plâtre quand le support s'y prête. Une main courante joue aussi un rôle de protection, comme les plinthes qui sont indispensables.

5. Escaliers utilitaires

5.1 Dimensions usuelles des escaliers privés

Les dimensions du corps humain (moins de 2 m de haut et 0,50 m de large environ) étant statistiquement définies, celles des passages le sont aussi et donc les dimensions d'escaliers varient peu en ordre de grandeur. Il est toujours admis, en habitation collective, que c'est le passage du cercueil qui conditionne la largeur de l'escalier et qu'il tourne si l'embranchement est de 1,10 m au moins en volées droites. Dans un escalier à noyau, il faudrait 1,20 m ou 1,30 m : ils sont souvent trop petits. La solution élégante, la moins encombrante, est la vis à jour de 1,00 m d'embranchement et 50 à 60 cm de vide (figure 17). On se croise bien et les marches rayonnantes ont encore 8 cm au jour pour monter 2,72 m sol à sol en 17 hauteurs de 16 cm avec des paliers développant 90 cm environ à la ligne de foulée qui permettent, dans un angle, une porte sur chaque paroi. Le brancard de 2,40 m passe même sans difficulté en surplombant la rampe.

Bien entendu, toute autre solution bien étudiée peut être recevable.

5.2 Établissements recevant du public (ERP)

Dans les ERP qui ne sont pas de grande hauteur, le principe est que les occupants puissent gagner la voie publique par l'escalier en sécurité, quelles que soient les circonstances, en un temps limité qu'un examen critique des textes permet d'estimer à 2 ou 3 min pour un adulte en bonne santé.

En effet, le parcours horizontal entre un point quelconque et une cage d'escalier est au maximum de 30 m et dure 30 s. La hauteur du plancher le plus élevé étant limitée à 28 m, la descente représente alors environ 2 min. Si le plan est bon, on est quasiment sorti.

En plan, les dimensions sont imposées par les unités de passage (UP) définies au § 1, 8 du chapitre II du titre II du règlement français (brochure 1477 des Journaux officiels) qui sont analogues dans les autres pays. Les embranchements sont donc exceptionnellement de 0,80 m (1 UP), normalement de 1,40 m (2 UP) et au besoin de 1,80 m (3 UP). Les longueurs de volée limitées à 25 marches permettent de monter un étage complet avec des marches normales, mais la demi-volée de 9 à 10 marches est plus usuelle. Sa pente est toujours définie par la formule de Blondel, ergonomique et réglementaire.

La largeur de passage est cumulative et doit, au total, assurer environ 1 UP pour 100 occupants, cet ordre de grandeur évitant des erreurs dans les premières études, mais devant être précisé au centimètre près selon les textes en vigueur pour l'exécution.

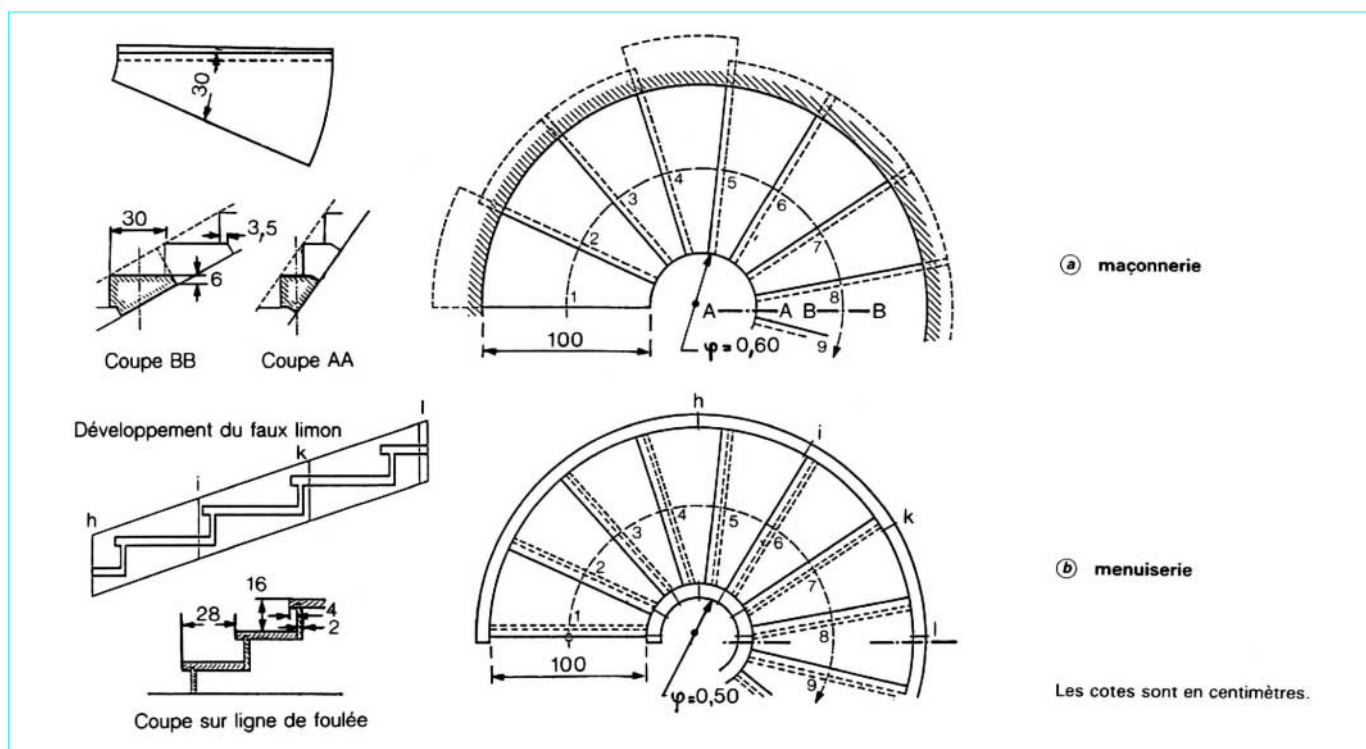


Figure 17 - Escaliers à vis

5.3 Immeubles de grande hauteur (IGH)

Le problème y est différent et concerne la résistance au feu de la cage d'escalier qui doit seulement assurer l'évacuation d'une faible population, le feu étant par hypothèse confiné sur un étage grâce à la résistance des planchers. Les largeurs de passage sont en pratique réduites à 2 UP (1,40 m) et le nombre des cages correspond uniquement à la longueur du trajet d'accès aux escaliers à chaque étage. Elle est obligatoirement comprise entre 10 et 30 m à partir de n'importe quel point et jusqu'à deux issues distinctes isolant les cages d'escalier par sas.

Les largeurs de passage ne sont pas cumulatives dans ces escaliers selon la population concernée, alors qu'elles le sont en ERP où tout le monde doit sortir.

Bien entendu, ces règles interprétatives résumées pour la conception ne dispensent pas du contrôle de chaque projet vis-à-vis de la lettre des règlements.

5.4 Plans types et tracé

Dans les ERP et les IGH, l'usage par un *public* étranger à l'édifice exige que toutes les marches soient identiques et régulières. On n'admet donc que des volées droites, si possible de longueurs analogues, ou des volées circulaires pour lesquelles le giron des marches est limité, en France, entre 20 et 42 cm.

Les emmarchements étant en nombre limité, le nombre des plans possibles se réduit à 4 ou 5 en pratique.

Les demi-volées des escaliers de la figure 18 auront toujours une longueur voisine de 2,24 m ($= 8 \times 0,28$) correspondant à des hauteurs de marche de 17 cm environ pour des étages de l'ordre de 3 m, avec une pente normale de l'ordre de 1/2. L'escalier de 2 unités de passage (UP) dont la cage occupe 16 m^2 hors œuvre (HO) est le plus fréquent et le plus valable en IGH.

L'escalier de 3 unités de passage est encombrant et l'absence de main courante dans la file centrale nuit à la sécurité.

L'escalier à volées croisées de la figure 19 assure deux issues distinctes par niveau, donc 4 unités de passage, et occupe la même surface qu'un escalier à 3 unités de passage. Les issues, au prix d'un décor quelque peu sévère, peuvent être isolées par une paroi coupe-feu si les volées sont séparées par un mur d'échiffre, réalisant le célèbre schéma topologique de la vis à double révolution du château de Chambord.

L'escalier circulaire de 2 UP exige un vide central de 2,60 m de rayon (figure 7) du fait des limites de largeurs des marches, donc une surface d'environ 21 m^2 . Celui de 3 UP en exige un de 4,20 m, c'est-à-dire occupe un cercle de plus de 8 m de diamètre qui est forcément monumental (§ 6.3).

Dans ces ouvrages, on subira toujours des servitudes économiques. Les dimensions étant imposées, on ne pourra jouer que sur les matériaux avec l'obligation qu'ils soient incombustibles, résistants à l'usure, faciles d'entretien (§ 7).

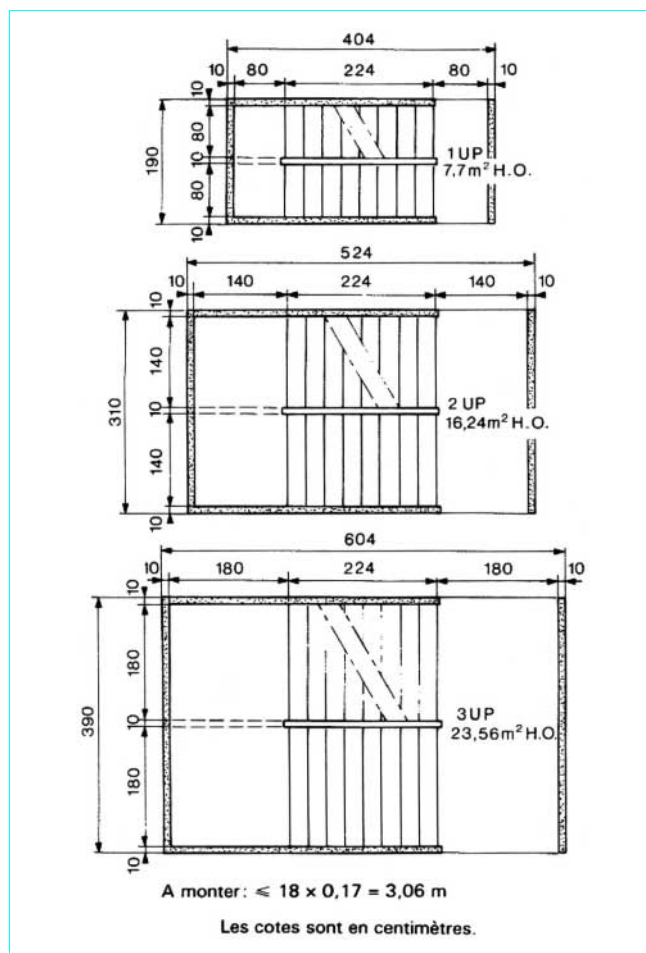


Figure 18 – Escaliers classiques conformes aux règles IGH

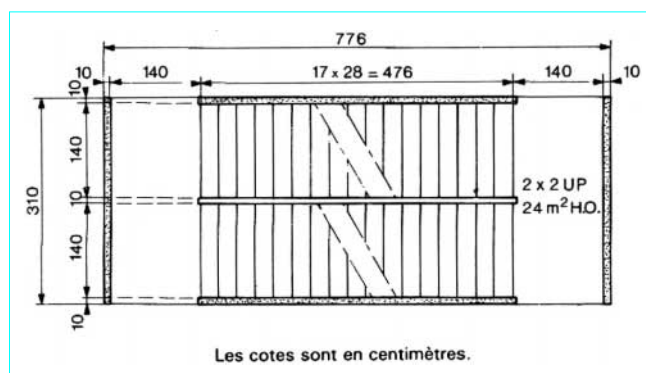


Figure 19 – Escalier à deux volées croisées conforme aux règles IGH pour deux issues

6. Escaliers particuliers

Dans les édifices privés, on peut s'affranchir de la sèche régularité et rechercher des formes pour leur valeur esthétique. Mais la technique peut poser des problèmes de géométrie du même ordre : l'escalier d'accès à un réservoir d'hydrocarbures est en général un hélicoïde sphérique qu'il faut savoir tracer sans qu'il crée un risque pour le personnel qui doit y circuler.

6.1 Tracé

Le tracé se fera forcément en plan pour commencer, la pente admissible imposant à la ligne de foulée un développé selon la hauteur à monter. La longueur du parcours pourra même être tournée et retournée au gré de toutes les fantaisies tels les innombrables fers à cheval, tous différents (figure 6e).

Sauf pour les escaliers monumentaux où les problèmes sont autres, à l'échelle de l'habitation il se posera fréquemment des questions d'échappée. La règle est absolue : l'échappée ne se contrôle que par une coupe développant la ligne de foulée ; les amateurs s'y laissent prendre trop souvent. En outre, les irrégularités dans la hauteur sous plafond nuisent toujours au décor que l'on recherche (figure 5) et rendent souvent le passage dangereux, ce qu'un bon ingénieur ne peut admettre.

6.2 Marches. Balancement

Le tracé moyen ainsi défini, les marches sont normalement perpendiculaires à la ligne de foulée. Mais chaque changement de direction de celle-ci provoque des irrégularités aux extrémités. Si l'escalier est large, elles sont inacceptables à moins des tracés complexes de marches courbes où s'est complu le XVIII^e siècle de l'Europe centrale. Dans les escaliers d'habitation, on se contente de corriger les irrégularités de façon approximative.

6.2.1 Balancement des marches

Les recherches qui ont mené à inventer le balancement (A. Bosse) ont d'abord concerné la forme de la rampe, puis la continuité du tracé du mur d'échiffre et des limons. Les solutions pendant un siècle sont restées du domaine de la sculpture des marches courbes en pierre. Les charpentiers, dont les nez de marche en bois devaient être de fil, donc rectilignes, ont proposé de faire varier linéairement les collets selon la figure 20, le giron restant, comme il convient, constant sur la ligne de foulée. En reportant sur son tracé en plan des girons égaux g et sur la ligne des collets (au jour) les n longueurs 1, 2, ..., n variant régulièrement, on trouve l'épure que les charpentiers ont depuis deux siècles faite en vraie grandeur à l'atelier pour tailler les marches. Il faut balancer un nombre de marches suffisant pour que le collet minimal c ne soit pas trop petit. L'épure peut se remplacer par un calcul simple d'interpolation linéaire. S'il y a $2n$ marches balancées avec un rayon à la foulée R_f et un rayon au jour R_j nous avons :

- demi-développé à la foulée : ng ;
- demi-développé au jour : $ng - \frac{\pi}{2} (R_f - R_j)$.

Si la ligne de foulée est à 0,50 m du jour (cote usuelle), la distance à rattraper est toujours de $(\pi/2) \times 0,5 = 0,785$ m pour un quartier tournant à 90°, quel que soit le rayon de la courbe de raccordement.

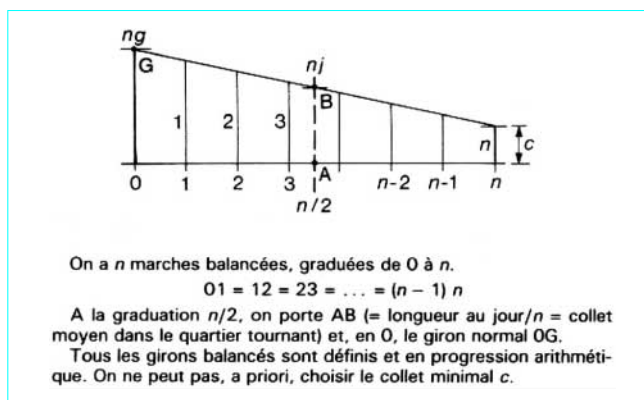


Figure 20 – Cas général du balancement

6.2.2 Balancement en plan

Un tracé facile permet de dessiner un balancement directement sur le plan à l'échelle.

Sur un dessin, la cage d'escalier et la ligne de foulée une fois tracées, on se fixe le nombre de marches balancées à partir d'un certain nez de marche. On peut se fixer ce nez de marche comme base de balancement et une longueur sur cet axe comme pas d'amortissement ℓ . Le pas donne l'espacement des intersections avec la base d'amortissement du prolongement des nez de marche successifs qui sont fixés sur la ligne de foulée. On le choisit selon ce qui est visuellement convenable pour la partie la plus accentuée de la courbure au plus petit collet c . Le tracé de la figure est évident (figure 21). La dimension logique du pas s'obtient à partir des marches qui correspondent au collet c , mais ce n'est pas obligatoire.

Le souci d'élégance conseille la symétrie et donc que c corresponde à l'axe (cas de la figure 21) ou à deux marches de part et d'autre.

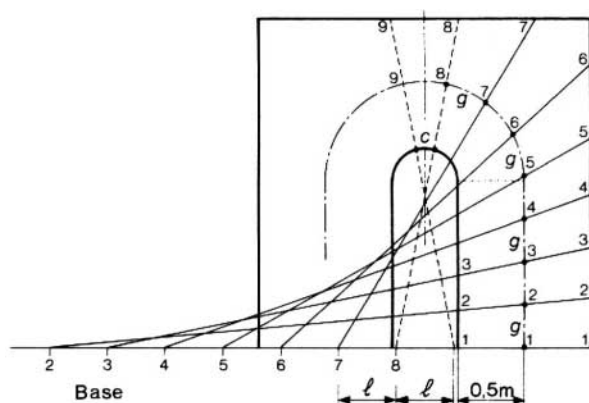
6.2.3 Balancement. Tracé au mur du fond de cage

Le premier tracé proposé vers 1800 par Rondelet est toujours réalisé par les spécialistes de voûte sarrazine sur le mur du chantier.

Ayant tracé les niveaux de marche (figure 22), on part de l'axe de la partie courbe et l'on trace la direction P de la pente de l'escalier sur la ligne de foulée, la pente P_j au jour, la plus forte, correspondant à la plus faible longueur du développement et, si l'on veut, la pente au mur P_m , la plus faible. Les praticiens raccordent par une ligne arbitraire ces lignes de pente. Les cercles tangents, faciles à construire, sont souvent choisis comme tracé géométrique. On obtient la longueur de marches aux collets qui donnent un tracé régularisé. Si l'on opère de même au mur, la ligne de foulée n'est plus tout à fait régulière, ce qui peut être admis dans un escalier privé dans un souci d'élégance visuelle en supprimant les jarrets des limons, ce que savent faire les artisans habiles.

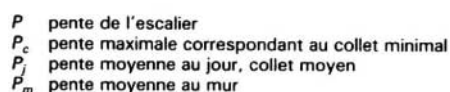
6.2.4 Autres tracés de balancement

Bien que les praticiens en aient ignoré le plus grand nombre sur les chantiers, les auteurs ont inventé d'innombrables tracés pour réaliser le balancement avec des nez de marche rectilignes. Cela n'a plus guère de sens avec les réalisations actuelles où l'économie exige que les marches en bois soient faites en série, donc droites ou rayonnantes. Les marches des escaliers préfabriqués sont



La ligne de foulée graduée en marches étant tracée, on choisit arbitrairement et visuellement le collet minimal et la première marche balancée (1-1-1). On choisit de même le pas d'amortissement. Le tracé des nez de marche est immédiatement défini par le point sur la base d'amortissement et le point sur la ligne de foulée.

Figure 21 – Balancement en plan



Nota : on peut choisir arbitrairement aussi bien le nombre de marches à balancer que la longueur du collet minimal et, à la rigueur, les deux si l'on renonce à une courbe de balancement simple telle que le cercle.

On peut aussi balancer le faux limon au mur. Dans ce cas, la pente sur la ligne de foulée ne reste pas tout à fait régulière.

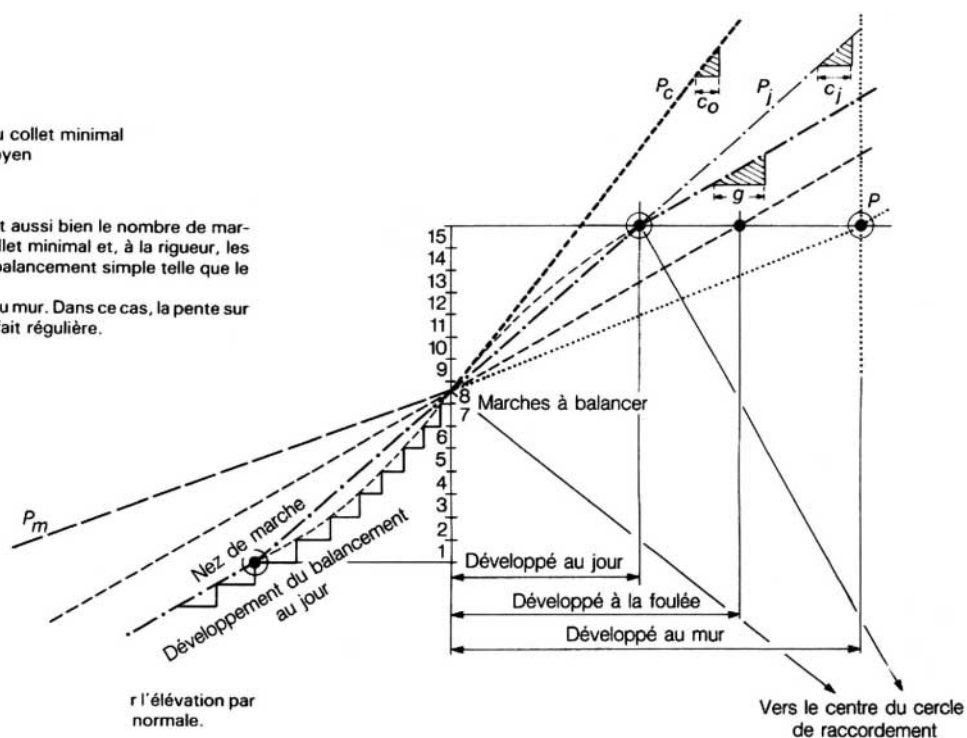
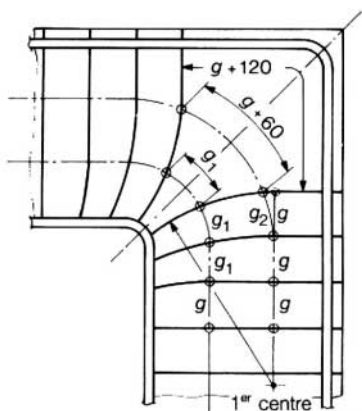


Figure 22 – Balancement au mur de cage. Tracé sur l'élévation par raccordement de la pente maximale à la pente normale

moulées : il y a donc tout intérêt à réaliser le balancement avec des marches courbes selon la tradition initiale, chaque volée étant dessinée en fonction du mouvement *réel* de l'usager (figure **23**). Les tracés les plus simples comportent des segments circulaires raccordant les nez de marches droites aux collets, mais si les lignes de foulée possibles le suggèrent, on peut tracer les marches selon n'importe quelle famille de courbes orthogonales (figure **6f**).

6.3 Grands escaliers

Qu'on le recherche ou non, un grand escalier est forcément monumental. Les grands volumes dans lesquels ils se développent en intérieur et leurs seules dimensions en extérieur prennent pour l'usager une importance accrue par la conjonction des impressions sensorielles qu'ils provoquent.



Ce tracé correspond aux grands escaliers classiques de 1,50 m d'embranchement. Il assure une marche correcte quel que soit le chemin suivi, le palier étant pris au jour comme une marche, au milieu avec un pas simple, à la rampe du mur comme un repos de 2 pas.

Les faux gironnements g_1 et g_2 diffèrent de g de moins de 1 cm, ce qui est insensible.

Les tracés des marches se font par droites et cercles.

Les cotes sont en centimètres.

Figure 23 – Balancement du palier d'angle d'un grand escalier par marches courbes

On a pu avoir tendance à ne prendre en compte dans l'étude de certains d'entre eux que les données ergonomiques. L'exemple des aménagements des gares du siècle passé est caractéristique du fait. L'expérience a toujours prouvé qu'on y circulait moins bien quand ils négligeaient trop les données de la psychologie collective.

Sans les développer, il est indispensable d'en rappeler les quelques principes nécessaires pour éviter de graves erreurs dans la réalisation d'ouvrages utilitaires que tout praticien peut être amené à réaliser sans qu'elle mérite une étude exceptionnelle.

6.3.1 Conjonction des effets sensoriels. Vue et kinesthésie

L'impression visuelle est renforcée par la perception kinesthésique et inversement : la fatigue perçue est d'autant plus grande que l'escalier est plus large ! Ce paradoxe impose d'employer avec prudence la formule de Blondel (§ 2.2), notamment en extérieur où le pas est plus long en circulation horizontale. Les marches tolérables y sont toujours moins hautes, les volées également, et les paliers intermédiaires doivent être soigneusement contrôlés selon le paragraphe 2.3.

6.3.2 Interprétation des règles de sécurité

Dans cette optique, les tracés de circulations accessibles au public doivent tenir compte, avec beaucoup de prudence, des règles de sécurité, qu'elles soient édictées par les textes officiels ou non. Se fier sans réflexion à la limite autorisée d'une dimension de marche ou d'une longueur de volée peut être une erreur.

Ce genre d'interprétation est source de discussions et d'incompréhensions entre praticiens défendant les points de vue opposés : il est indispensable de pouvoir les motiver et les justifier pour faire aboutir un projet.

6.3.3 Ambiance et confort. Dimensions

Une recherche d'économie mal placée nuit à la sécurité, mais elle nuit aussi à l'efficacité : les temps de circulation du personnel dans un immeuble sont souvent importants et leur réduction, outre les installations d'ascenseurs, exige des tracés judicieux des couloirs et des escaliers. Il faut penser que le prix de 1 m^2 de construction reste toujours très inférieur à ce que coûte un mois du salaire individuel minimal pour utiliser l'argument financier justifiant une dépense par une économie de fatigue et de temps pendant des années : l'escalier doit être assez facile pour dissuader parfois d'attendre l'ascenseur.

L'agrément de passer d'espaces confinés à de grands volumes peut y aider, et un tracé d'escalier peut améliorer l'aspect d'un vestibule où les lignes obliques créent un décor toujours intéressant.

Les dimensions correspondantes ne sont pas celles du paragraphe 5 ; les volées n'ont pas de raison d'être différentes, et les deux unités de passage de 1,40 m suffisent à faire tous les grands escaliers. Mais il n'est pas souhaitable que la pente excède $1/3$, ce qui développe sur 9 m une montée d'un étage normal. Pour voir l'escalier, il faut passer par un jour assez ample au départ, avec le dégagement de paliers entre lesquels on ne monte pas plus de 1,50 m, développant les volées sur environ 5 m en plan, soit le long des côtés d'une cage qui ne pourra pas avoir moins de 50 m^2 .

La trémie où passera un escalier libre aura la même taille et il ne se développera donc bien que dans un vestibule de plus de 100 m^2 .

Le tracé des marches a montré que l'escalier circulaire monumental se fera aisément et qu'avec 1,40 m d'embranchement, pour n'être pas mesquin, il se développera largement. Il pourra être plus large, avec des marches toujours accessibles d'une rampe à l'autre sans difficulté, sinon qu'il s'inscrira dans un cercle de près de 12 m.

7. Matériaux et techniques

Malgré la spécialisation où la haute qualité des artisans les a menés, il n'y a guère de techniques réellement particulières aux escaliers. On en commandera à un *escalier* bien moins souvent qu'à un bon menuisier, ou à un bon charpentier, ou à un bon serrurier. Il faudra un bon architecte pour coordonner les exécutants multiples dans une réalisation de luxe compliquée. Les rampistes eux-mêmes sont de plus en plus rares, comme les mains courantes en bois sculpté qui exigeaient leur savoir-faire.

Les techniques d'exécution sont donc celles qui sont détaillées dans d'autres articles de ce traité : charpente en bois ou en métal, menuiseries en tous matériaux, maçonnerie ou béton armé, etc. Seules les formes à réaliser sont spécifiques et définies dans un dessin à une échelle en rapport avec la qualité recherchée : un profil de nez de marche ou de main courante doit être dessiné à l'échelle 1.

Il semble bien n'y avoir qu'à choisir les matériaux pour leur meilleur usage.

7.1 Bois

Les petits escaliers issus de l'échelle ont toujours été et sont encore en bois, tels les escaliers individuels intérieurs quelle que soit leur forme. Les agglomérés servent dans les éléments de marche ou de remplissage et le lamellé collé se prête mieux au monumental que le bois massif ne l'a jamais fait.

7.2 Maçonnerie

Les grands escaliers ont tous été en maçonnerie, en pierre de taille pendant longtemps et leur durée reste assurée. Les maçonneries de tous types, jusqu'au galandage, se trouvent et se font toujours.

7.3 Fer, fonte, acier

Remplaçant d'abord la pierre des balustrades, le fer et l'acier, employés depuis deux siècles, ont pris à une époque la première place dans l'ossature et l'ont conservée dans les réalisations monumentales. Fer forgé d'abord, fonte ensuite et encore actuellement dans les éléments industrialisés, acier de serrurerie et de charpente ont permis et permettent des réalisations de toute importance. Les aciers patinables en extérieur et les aciers inoxydables en ferronnerie permettent des réalisations de prestige.

7.4 Autres métaux

Les métaux non ferreux sont aussi généralement utilisables que l'acier mais sont plus chers. L'aluminium, pour sa légèreté, s'emploie dans les escaliers mobiles, ou moulé dans les escaliers industrialisés de qualité. Les métaux cuivreux, onéreux, ne sont fréquents que dans les éléments (mains courantes, attaches) ou des réalisations de prestige.

7.5 Béton armé

Depuis 1900, le béton armé est peu à peu devenu le matériau usuel, d'autant plus que son inertie est favorable à l'acoustique, à la résistance au feu et à son aptitude aux réparations. À l'inverse, c'est un matériau fruste qui se place mal comme finition : rampes et surtout mains courantes. En parois, il n'est qu'utilitaire et exige un revêtement d'usure et d'aspect, enduit ou autre.

7.6 Verre

Des moulages épais résistent dans des ossatures métalliques pleines et translucides depuis un siècle. La sécurité exige actuellement l'usage de verre feuilleté qui n'est pas un support de circulation, tandis que le verre trempé, qui a été utilisé comme tel dans les marches de réalisations spectaculaires des années trente à cinquante, semble désormais cantonné, à des remplissages de dimensions limitées.

7.7 Matériaux synthétiques

Là comme ailleurs, leur emploi est de plus en plus fréquent lorsqu'il répond à sa fonction.

Les thermoplastiques moulés ou en feuilles sont quasi universellement employés comme revêtement normal de marches ou de mains courantes. Des pièces rigides de garde-corps mises en forme existent, mais sans remplacer le métal plus résistant au feu et aux actions mécaniques. Des pièces en plastique renforcé sont aussi utilisables, mais l'emploi le plus fréquent reste celui des matériaux transparents (métacrylate, polycarbonates) que leur prix limite à des réalisations de prestige assez fréquentes en France comme à l'étranger.

Bien que limités dans leurs emplois structurels par leur faible module d'élasticité, les plastiques moulés s'emploient dans des petits éléments préfabriqués tels que les marches de colimaçon quasi mobiliers.

7.8 Mise en œuvre

La mise en œuvre d'un matériau est régie par des techniques spécifiques dont les conditions particulières ne peuvent que limiter l'usage sans jamais rien apporter de nouveau. Selon le tableau 1, d'innombrables combinaisons sont permises et les développements technologiques possibles sont évidemment illimités.

Tableau 1 – Choix des matériaux pour escaliers

Matériaux		Éléments																		
		Marches posées	Marches à repos	Marches en porte-à-faux	Marches en consoles	Volées sur crémaillères	Volées sur limons	Volées sur paillasses	Échiffres	Pièces auxiliaires d'assemblage	Repos et paliers : poutres	Repos et paliers : dalles	Charpente portante ou déportée	Cage. Ossature	Cage. Clôture	Parois porteuses	Garde-corps	Revêtements de sols	Revêtements de murs	
Maçonnerie en béton armé	Maçonnerie légère	+	+ (3)	○	○	○	○	- (4)	+	○	○	+ (3)	○	○	+	+	+ (3)	(1)	(1)	
	Pierre de taille	+	+	+	+	○	+	+ (5)	+	+ (6)	-	+	+ (7)	+ (7)	+	+	+	+	+	
	Béton	+	○	○	○	○	○	○	+	○	○	○	○	○	+	+	○	+	+	
	Béton armé	-	+	+	+	+	+	+	-	○	+	+	+	+	+	+	+	(2)	(2)	
Bois et dérivés	Bois lamellé collé	○	-	+	+	+	+	○	○	○	-	○	-	-	○	○	+	(2)	(2)	
	Bois durs pour charpente	○	+	+	+	+	+	○	○	○	+	○	+	+	○	○	-	+	○ (2)	
	Bois usuels pour menuiserie	+	+	+	-	+	+	○	-	+	-	○	-	○	○	○	+	+	+	
	Bois d'ébénisterie	+	+	- (8)	-	- (8)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	+	+	+	
	Bois agglomérés	+ (2)	+ (2)	-	○	○	-	-	-	○	○	-	○	○	-	-	+	-	+ (2)	
Fer. Fonte. Acier	Acier doux serrurerie	○	+	+	+	+	+	○	○	+	+	+	+	+	+	○	+	+	+	
	Acier de charpente	○	+	+	+	+	+	○	○	+	+	+	+	+	○	○	-	+	○	
	Acier de tôlerie	-	+	+	+	-	+	-	○	+	+	+	-	○	+	-	+	+	+	
	Aciers patinables	○	-	+	+	-	+	○	○	○	+	-	-	○	+	-	-	-	- (2)	
	Aciers inoxydables	-	+	+	+	+	+	○	○	+	-	○	○	○	+	○	+	+	*	
	Fonte	○	+	+	+	+	+	○	-	+	+	-	-	-	-	○	+	+	-	
Métaux non ferreux	Aluminium façonné	○	+	-	○	○	-	○	○	○	○	-	○	○	+	○	+	○	+	
	Aluminium moulé	○	-	+	+	○	○	○	○	+	○	○	○	○	○	○	+	+	*	
	Cuivre	-	-	-	○	○	○	○	○	-	○	○	○	○	+	○	+	*	*	
	Bronze	-	-	-	-	○	○	○	○	-	○	○	○	○	-	○	+	*	*	
	Laiton	○	○	-	○	○	○	○	○	+	○	○	○	○	-	○	+	○	*	
Produits verriers	Glace trempée	*	*	○	○	○	○	○	*	○	○	*	○ (9)	○	+	○	+	* (9)	+	
	Verre feuilleté	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	+	○	+	○	+	
	Verre moulé	+	+	○	○	○	○	○	-	○	○	+	○	○	+	-	+	+	+	
Matières plastiques	Thermoplastiques moulés	+	-	○	○	○	○	○	○	+	○	○	○	○	+	○	+	+ (10)	+	
	Plastiques renforcés	-	-	-	○	○	-	○	-	+	-	-	○	-	+	+	+	-	+	
	Feuilles façonnées	+	-	○	○	○	○	○	-	○	○	○	○	○	-	○	+	-	-	
	Blocs usinés	-	+	+	-	○	-	○	-	+	○	-	○	○	○	○	+	+	-	
	Autres matériaux	(12)	(12)	(12)														(11)	(11)	

- + Excellente adaptation à la fonction.
- Usage possible : limitations dues aux qualités précises de matériaux et de mise en œuvre ainsi qu'au programme d'usage et de crédits.
- Usage généralement déconseillé pour insuffisance de résistance spécifique ou difficultés d'exécution.
- * Matériaux onéreux.
- (1) Tous enduits.
- (2) Recherche d'unité de matériaux (parfois onéreuse) ou d'économie de conception (sans limitation technique).
- (3) Fréquent en construction *légère* traditionnelle.
- (4) Pour volées très courtes.
- (5) Les paillasses en pierre existent mais ce sont souvent des voûtes à faible flèche.

- (6) Certaines pièces taillées ont un tel caractère.
- (7) La recherche de décor visuellement libre exige de concevoir comme charpentes certains appareils d'esprit ogival.
- (8) Des réalisations très soignées doivent avoir la qualité technique et le fini de l'ébénisterie, ce qui est onéreux pour ces dispositions.
- (9) Excellents exemples historiques. Actuellement, incompatibles avec la sécurité d'usage exigée.
- (10) Emploi possible dans une construction par systèmes, mais relativement peu résistant.
- (11) Fréquent : moquettes et autres textiles par exemple.
- (12) Les marches peuvent être considérées comme des sculptures en matériaux quelconques si leur forme ne leur impose pas de servitudes mécaniques.

Escaliers

par **Paul-Henri GENÈS**
Ingénieur des Arts et Manufactures
Architecte DPLG

Normalisation

Association Française de Normalisation (AFNOR)

- NF C 15-100 02-81 Installations électriques à basse tension. Règles.
 - NF E 85-010 11-83 Éléments d'installations industrielles. Échelles métalliques fixes. Échelles à crinoline.
 - E 85-011 04-75 Installations industrielles. Choix d'un moyen d'accès fixe entre deux niveaux.
 - E 85-031 06-77 Installations industrielles. Escaliers métalliques à volée droite.
 - NF E 85-101 11-83 Éléments d'installations industrielles. Garde-corps métalliques.
 - NF P 01-012 10-78 Règles de sécurité relatives aux dimensions des garde-corps et rampes d'escaliers.
 - NF P 06-001 06-86 Bases de calcul des constructions. Charges d'exploitation des bâtiments.
-