

Airtight houses and energy consumption

by Arne Elmroth and Arne Logdberg



Can extra insulation and airtight structures significantly reduce energy demands? The questions are considered here by scientists at the Division of Building Technology at Stockholm's Royal Institute of Technology, after studying the performance of single-family houses built to the new national code. One site-built design achieved an estimated one-third reduction in energy consumption; but another, less airtight factory-made house showed serious shortcomings in the indoor climate achieved.



In Swedish Building Code 1975 the requirements for thermal insulation for different building sections have been strengthened considerably, and completely new requirements for a building's airtightness have been introduced. The indoor climate — primarily air quality — and energy consumption have been studied in a number of free-standing houses in a group housing area. All these houses were very tight and, when pressure tested, had an air change rate less than 1 change/h at 50 Pa.

The mean consumption for the five houses was, during a period of one year, 18 700 kWh. The corresponding value for a similar house (dormer house with approximately 140 m² living area), built before the new requirements, is approximately 28 000 kWh. Thus the energy consumption as a result of improved thermal insulation and tightness has decreased considerably.

Two other houses (type B house), which when completed had an air leakage of approximately 3.0 changes/h at 50 Pa gauge and negative pressure, were also investigated when studying indoor climate. (Both types of houses, type A and type B, are fitted with mechanical exhaust air systems).

The air change rate in the master bedroom in type B houses was very low (5 m³/h) if the fan was set to its lowest value and the supply air valve (slot air valve) in the room was closed. From a hygienic point of view the air change rate should be at least 25 m³/h. In the tighter houses (type A houses) a significantly better air change rate was obtained.

The measurements indicate that an acceptable indoor climate in all areas can only be achieved if houses are tight, if the slot air valves are open and the fan set at a position which corresponds to an air change rate in the whole house of approximately 0.5 changes/h. Houses with exhaust air ventilation which are not sufficiently airtight involve a risk that an uneven air flow is

obtained, resulting in certain rooms not being ventilated sufficiently, either from a hygienic or technical point of view.

The approximate extra costs involved are estimated as follows:

- Airtightness Skr 5000, say £ 500 or FF 5000
 - Added thermal insulation
 - 70 mm in walls
 - 100 mm in roofs
 - triple glazed windows
- } Skr 22 000.
} say £ 2200 or FF 22 000

Background

Previous standard requirements in Sweden for outer structure thermal insulation and airtightness have been influenced by hygiene or comfort. There have been requirements for thermal insulation but, on the other hand, no requirements for building airtightness.

In Swedish Building Code 1975 the requirements for thermal insulation for different building sections have been made considerably more severe. For example the requirements for thermal insulation mean, in the case of mineral-wool insulated wooden walls, that the insulation thickness must be approximately 150-190 mm (depending on the geographical location of the house). In loft ceiling structures a mineral wool thickness of 220-260 mm is normally required. These are significant thicknesses which mean more complicated wall and joist structures than those previously used.

Completely new requirements for a building's airtightness have also been introduced. The purpose of the new regulations is to prevent too much *natural ventilation* through the building's external structure. The Code now contains a recommendation for the highest permeability for the whole building at a pressure difference of 50 Pa in relation to the outdoor air (table 1).

Table 1 Maximum permitted number of air changes in a completed building

	1 July 77- 30 June 78 change/h	After 1 July 78 change/h
Detached house or linked house	4.5	3.0
Other building of at least 2 storeys	3.0	2.0
Building of 3 or more storeys	1.5	1.0

In order to build such houses it is necessary to consider airtightness problems carefully. Great importance must be placed on how the different constructional parts are formed and, by no means least, how paths for installations — electricity, heat, water and ventilation — are to be provided (see figure 1).

Objectives

The way in which indoor climate — primarily air quality — and energy consumption is affected by very good airtightness, as well as by good thermal insulation, has been studied in a number of houses in a group housing area. During pressure testing all of the houses had an air change rate of 1 change/h at a pressure difference of 50 Pa immediately after erection. For the sake of comparison the climate has also been studied in a number of houses which, during pressure testing, have had an air change rate of approx 3 changes/h at a pressure difference of 50 Pa. Furthermore the change in the airtightness of the house has been determined during the course of the first few years.

Type A houses

These houses are built on site, designed and erected by Byggnads AB Folkhem, Stockholm (figure 2). The houses are all of the same type and are situated in a group housing area approximately 40 km east of Stockholm.

During the planning stage considerable effort has been made to achieve good building engineering solutions. Furthermore high demands have been placed on work procedures, particularly thermal insulation and airtightness work on the building site. All the houses were pressure tested before occupation and all had an air leakage less than 1.0 changes/h at 50 Pa gauge and negative pressure in the house. The Institution for Building Technology at the Royal Institute of Technology, Stockholm, has carefully followed the whole building process (Elmroth A, 1978). Thus the houses are very airtight.

The ventilation system is of an exhaust air type and is fan controlled. Supply air is delivered through special air supply devices (slot air valves) in window frame heads. The slot air valves can be regulated but cannot be closed completely.

The houses are built on ground slabs and are of a dormer design.

Pressure differences

To check whether the fan in the house could create a negative pressure in the whole house, the pressure difference in relation to the outdoor air at different facades has been measured.

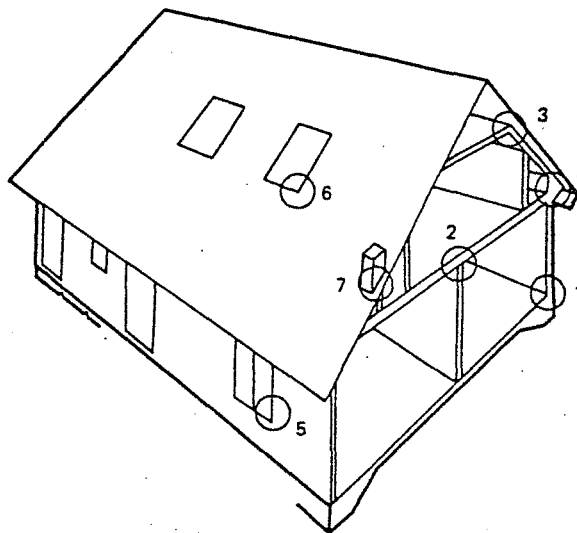


Figure 1
The houses in their setting. Drawing shows joints and connections where extra care is needed to achieve airtightness. 1- junction of external wall and ground, 2-loadbearing partition and gable wall/attic floor, 3-attic roof and roof slope, 4-eaves, 5-joints around windows, 6-joints around roof fanlights, 7-entry for services

Les maisons dans leur cadre. Le dessin montre les joints et raccords qui nécessitent une attention particulière pour obtenir leur étanchéité — 1. jonction mur extérieur, sol, 2. cloison porteuse et mur pignon/plancher du grenier, 3. étage sous le toit et pente du toit, 4. avant-toit, 5. joints autour des fenêtres, 6. joints autour des lucarnes, 7. entrée pour les gaines de service

Table 6 Energy balance for type A house for a normal year in Stockholm's climate with an indoor temperature of + 20 °C and an average ventilation rate of 0.5 changes/h

Energy losses	
transmission.....	13 100 kWh
ventilation.....	6 700
household electricity.....	1 000
drainage water.....	3 500
(hot water drainage)	
Total energy losses.....	24 300 kWh
Energy gains	
heating plant.....	11 000 kWh
hot water production.....	5 000
household electricity.....	3 500
solar radiation.....	3 200
body heat.....	1 500
	} free energy
Total energy supplied.....	24 300 kWh
Total purchased energy.....	19 500 kWh

Theoretical transmission losses

Calculation of k-values have been carried out in accordance with Swedish Building Code 1975. Calculations have been carried out so that the total area of framework members, noggings pieces, support timbers, cross ties, etc. is included. See table 5.

Table 5 Calculated k-values, areas and transmission losses per °C through different building sections in type A houses

Building Section	k-value W/m ² °C	Area m ²	k × A W/°C
Floor over crawl space..	0.29	77.2	22.39
External walls.....	0.28	206.0	29.68
Roof.....	0.16	35.0	5.53
Sloping roof areas	0.19	57.1	10.68
Windows.....	1.90	20.4	38.76
Doors.....	0.95	5.0	4.75
		Σ k × A = 111.71	

Table 7 Expected demand for purchased energy supply for different indoor temperatures and ventilation rates

Indoor temperature (°C)	Ventilation (change/h)	Purchased energy (kWh)
20	0.5	19 600
	0.25	16 200
19	0.5	18 400
	0.25	15 200
18	0.5	17 200
	0.25	14 200

The total transmission losses during the year and for 110 000 degree hours amount to 12 288 kWh. The calculated transmission losses, based on short-term measurement, amount to 13 100 kWh. Thus the difference is only 812 kWh. The values show good correlation, which indicates that, in airtight houses where the air change rate can be expected to be relatively constant over the year, short-term measurements for calculating energy consumption provide good results.

Table 6 shows the calculated energy balance during a normal year for a type A house. The indoor temperature has been assumed to be + 20 °C and the average ventilation rate 0.5 changes/h. The transmission losses have been calculated using the results from short-term measurements. How the energy consumption changes if the indoor temperature and ventilation are changed is indicated in table 7.

Calculated and measured consumption

The total energy consumption in five houses was read off from the houses' of electricity meters. The indoor temperature was checked a number of times during the year. The householders gave an assurance that no changes were made to the thermostat settings on the electric radiators. The quantity of exhaust air was measured at each reading opportunity from the electricity meter and has been assumed to be constant during the year.

Tables 8a and 8b indicate the true energy consumption over a period of two years compared to the calculated energy consumption (as in table 6).

These results indicate that the measured energy consumptions agree favourably with those calculated. When the indoor temperature and the ventilation rate are known, it is possible to calculate

Table 8 a Calculated and measured energy consumption between February 1978 - February 1979

House	Measured indoor temperature °C	Measured air change rate changes/h	Energy consumption kWh/year	
			Calculated	Measured
A1	19-20	0.35	17 100-18 000	17 900
A2	20-21	0.50	19 600-20 500	19 450
A3	17-18	0.50	16 100-17 100	16 000
A4	20-21	0.50	19 600-20 500	20 500
A5	19-20	0.50	18 400-19 600	18 900
			Average 18 500	

Measurements were carried out with the fan set at basic speed, at 50 per cent and at 100 per cent full fan capacity. When the fan is set at basic speed an air change rate of approx 0.25 changes/h is obtained in the whole house. At full fan capacity there is an air change rate of 0.9 - 1.0 changes/h. Full fan capacity is designed primarily for use during food preparation. Measurements were carried out on two different occasions with different wind speeds. In the first case the wind speed was high (approx 10-12 m/s, southerly) and on the second occasion moderate (approx 3-6 m/s south-easterly). On both occasions the external temperature was approximately 0 °C and the indoor temperature approx 20 °C.

Examples of measurements results in a type A house are shown in tables 2 and 3.

Table 2 Results from air pressure measurements in type A houses, trial 1 (slot air valves open). All values indicate that the air pressure is lower indoors than outdoors. Wind speed 10-12 m/s (S)

Facade	Pressure difference Pa with fan set at		
	basic speed	50 % of full capacity	100 % of full capacity
Longside living room north facing (leeward side)	1-2.5	4-6	10-11
Longside external door south facing (windward side)	5-6	9-11	19-22

Table 3 Results from air pressure measurements in type A house, trial 2 (slot air valves open). All values indicate that the air pressure is lower indoors than outdoors. Wind speed 3-6 m/s (SE)

Facade	Pressure difference Pa with fan set at		
	basic speed	50 % of full capacity	100 % of full capacity
Longside living room north facing (leeward side) ...	2-4	4-6	8-12
Longside external door south facing (windward side).....	4-5	4-6	12-14
Upper floor west facing .	1-2	4	8-12
Upper floor east facing .	0-1	1-2	5-6

All measurements indicated that there was a negative pressure in the houses. The pressure difference changed immediately when the fan's speed was increased or decreased. No significant pressure difference was measured between upper and lower floors in the test houses. An interesting observation is that, with a wind speed as high as 10-12 m/s, there was a negative pressure on both the windward and leeward sides in type A houses with the fan set at basic speed. (These pressures were 5 and 2 Pa respectively. See tables 2 and 3).

The result of the pressure difference measurements gives a clear indication that the ventilation is controlled to a significant degree by the setting of the exhaust air fan. The external climate has only a marginal effect on ventilation in airtight houses.

Energy consumption

Energy consumption during a normal year has been estimated by registering energy consumption, air change rate, temperature difference between outdoors and indoors and possible solar radiation during a few, relatively short measurements periods (16-19 hours). On the basis of these short-term registrations, transmission and ventilation losses can be approximated for longer periods. Such calculations can be made, provided the houses are unoccupied and that the external climate is stable both during the trial and for a certain period prior to commencement.

Energy consumption for hot water and household electricity in occupied houses has been extracted from a paper by Munter (1974), as have estimated values of the proportion of energy usage constituted by direct losses. Energy gains from solar radiation to the houses has been approximated as 3200 kWh/year.

The total number of degree hours for Stockholm is shown in table 4 for different indoor temperatures.

Table 4 Calculated degree hours for Stockholm using normal outdoor climate figures for different indoor temperatures during the heating season. This is assumed to begin when the mean diurnal temperature goes below + 12 °C and ends when it again exceeds + 10 °C

Indoor temperature °C	Degree hours °C h
20	110 000
19	103 000
18	97 000

When calculating the energy consumption for ventilation during one year, the air change rates have been assumed as 0.25 changes/h and 0.5 changes/h respectively. The reason for this is that many house-holders normally set the fan to approx 0.25 changes/h. According to the Swedish Building Code however the air change rate should be 0.5 changes/h.

Table 8 b Calculated and measured energy consumption between February 1979 - February 1980

House	Measured indoor temperature °C	Measured air change rate changes/h	Energy consumption kWh/year	
			Calculated	Measured
A1	19-20	0.45	18 600-19 400	20 800
A2	19-20	0.35	17 100-18 000	18 500
A3	18-19	0.50	17 200-18 600	16 900
A4	20-21	0.50	19 600-20 500	20 400
A5	18-19	0.50	17 200-18 600	17 400
			Average 18 800	

the annual energy consumption with reasonable accuracy and in quite a simple manner. Different living patterns (hot water consumption, household electricity) can explain the differences between measured and calculated consumptions.

In well-insulated, airtight houses there is no evidence of dramatic changes in energy consumption unless the mean annual temperature during the year is significantly greater or less than the normal value. Furthermore, the results indicate that natural ventilation is low and varies insignificantly in relation to the outdoor climate.

Monitoring airtightness

The Swedish Building Code recommends that free-standing single-family dwellings shall have an airtightness of 3.0 changes/h at a gauge or negative pressure of 50 Pa. The five houses described above all had an airtightness of less than 1.0 when the houses were completed.

One constructional requirement is that the houses' airtightness shall remain unchanged. At the Institute, pressure measurements have therefore been carried out to discover whether the houses' airtightness changes significantly with time. Table 9 shows the results.

Table 9 Results of pressure tests over a three year period

House	Air change rate, changes/h, with a pressure difference of 50 Pa when pressure testing		
	October 1977	February 1979	February 1980
A1	0.8	1.6	1.5
A2	0.7	1.1	1.2
A3	0.7	1.5	1.4
A4	0.7	1.0	1.1
A5	0.8	1.2	1.3

They indicate that a relatively high increase in air leakage is evident after the houses have been occupied for a year. During the latest measurements, no further change has occurred (the values lie within the measuring equipment's accuracy range). The reason for the considerable increase during 1979 is probably that the house dried out during the first year, when small cracks can have arisen, primarily between external walls and intermediate joist structures.

The result from pressure tests gives a clear indication that airtightness remains constant for a long period after drying out.

Indoor climate

During an investigation of the indoor climate it was shown that two type B houses had an air leakage, when completed, of 3.0 changes/h at 50 Pa negative and gauge pressure respectively. (Compare with type A houses < 1.0 changes/h).

These type B houses are factory built as two volume elements and eight roof elements, and also have accessible foundations. The houses are similarly designed as dormer houses (see figure 3).

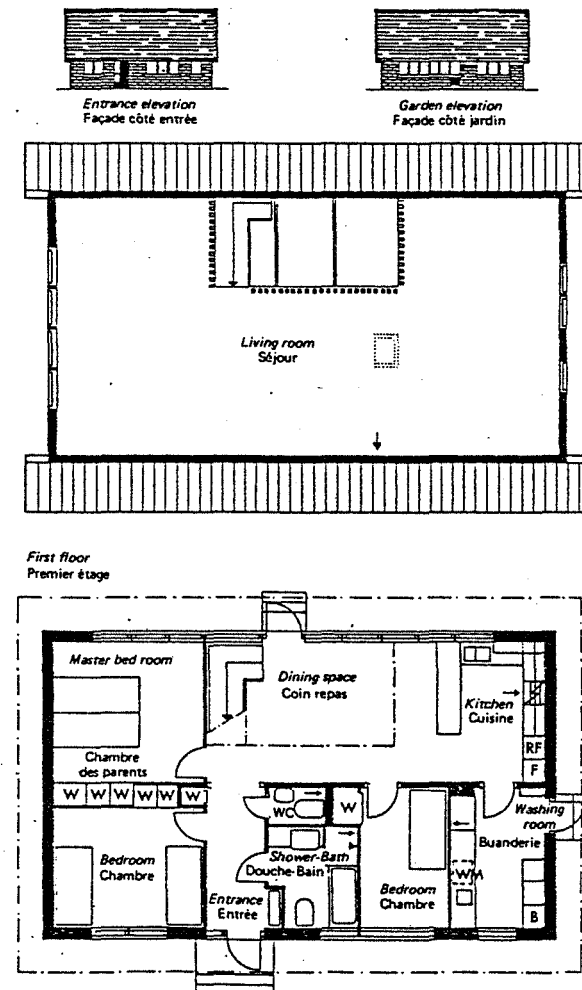


Figure 3 House type B, used as a cross-reference to the performance of the main subject house (type A). The design, though factory-engineered, produced higher air-change rates and a poorer indoor climate.

Maison de type B, utilisée comme référence par rapport à la performance de la maison principale soumise aux essais (type A). Cette conception, bien qu'industrialisée, produisait des taux de renouvellement d'air plus élevés et un climat intérieur plus médiocre.

The exhaust air ventilation system is fan-controlled. Air is supplied through special air supply devices (slot air valves) in the window frame heads. The slot air valves can be adjusted but cannot be closed completely.

Air change rate

Tracer gas measurements have been carried out to monitor air change rates in individual rooms occupied by people over long periods (eg bedrooms).

In houses ventilated with an exhaust air system there are usually no exhaust air devices in bedrooms, workrooms, etc., whereas such devices are fitted to wet rooms (bathrooms, toilets, etc.) and kitchens. 'Tainted air' is extracted via exhaust air devices in these areas wherein outdoor air is drawn into the house through supply air devices (slot air valves) usually positioned above windows in the rooms where exhaust air devices are not fitted. A certain amount of air also comes through leakage sources in the house.

The exhaust air flow is often regulated with a centrally-positioned control device on the cooker hood. The exhaust air fan is normally positioned in a ventilation flue above the roof.

The fan is set so that its basic flow corresponds to the air change rate (l/s) given in the Swedish Building Code for each individual wet room and kitchen. The minimum air change rate for the whole house must, however, not be less than 0.35 l/s m². This value corresponds to approximately 0.5 changes/h for the whole house. (There is no indication of a minimum change rate for individual rooms in the Swedish Code ; it merely states that 'hygienic discomfort must not arise').

From a hygienic point of view, an air change rate of 4 m³/person and hour, at 18 °C and a relative moisture content of 60 per cent, is the minimum change rate to ensure that the air shall not contain more than 0.5 per cent CO₂ (the maximum value allowed at a place of work by the National Swedish Board of Occupational Safety and Health). There is no corresponding value for dwellings. Bearing in mind comfort requirements such as smell, a relative humidity value in the room which is not too high, and consideration of material-conditioned evaporation including radon, an air change rate of 10 m³/person an hour is a more suitable limiting value, (see Ubish 1977). This means that in the master bedroom a ventilation rate of approx (10 + 10 + 5) = 25 m³/hour is necessary if two adults and one child sleep in the room.

In all the houses which were investigated it was very easy for the individual householder to adjust the fan — and therefore the total air change rate in the house. In type A houses, the fan's basic setting — or basic speed — (lowest fan setting) has been adjusted so that the total air change rate in the house was approximately 0.5 changes/h including natural ventilation. The average air change rate at the basic speed in type B houses was 0.23-0.26 changes/h for the whole house including natural ventilation. The reason for having a 'basic speed' which gave approximately 0.25 changes/h in type B houses was said to be that, during the daytime or during a longer absence from the house, it should be possible to reduce the ventilation and thus the energy consumption. There is no position which indicates when the houses have an air change rate of approximately 0.5 changes/h in type B houses.

It has been shown that most householders nearly always had the fan set to its lowest value in order to save energy.

The greatest risk of being subjected to an unacceptable indoor climate occurs in bedrooms since these are occupied for longer periods and since these rooms do not have exhaust air devices. The measurement results shown in table 2 indicate the air change rate in type A and B houses with the fan set at basic speed and in accordance with the Swedish Building Code's recommendation (approx. 0.5 changes/h). Measurements were carried out with the slot air valve both open and closed. The measurements shown relate to a master bedroom of approximately 13 m². The doors to the respective bedrooms were kept closed.

Table 10 clearly shows that only type A houses have an air change rate which corresponds to the recommended value of 25 m³/hour. In type B houses, with the fan set at basic speed, the value was as low as approximately 5.0 m³/h with the slot air valve closed. The value is totally unacceptable from a hygienic point of view and causes an increase in relative humidity and CO₂ content. The results also show that the slot air valves have a decisive effect on

Table 10 Air change rates for different fan settings in master bedrooms with open and closed slot air valves respectively. Bedroom doors were closed (m³/h)

Fan Setting	House A	House B1	House B2	Recommended value
Basic speed approx 0.25 changes/h in the whole house (slot air valve closed)	—	4.7	5	25
Basic speed approx 0.5 changes/h in the whole house (slot air valve open)	—	9.7	12.2	25
As per Swedish Building Code approx 0.5 changes/h in the whole house (slot air valve closed)	21.6	9.4	8.4	25
As per Swedish Building Code approx 0.5 changes/h in the whole house (slot air valve open)	29.5	18.5	19.6	25

the air change rate in the rooms. For this reason it should not be possible to close the slot air valve completely.

Even when the fan was set to correspond to the values quoted in the Swedish Building Code, very low values were, however, still obtained in type B houses (with the slot air valve closed). This value is approximately the same as at basic speed with the slot air valve open.

CO₂ content

In type B houses, very low air change rates were measured in bedrooms. The lowest value measured is 5 m³/h, which corresponds to an air change rate of 0.15 changes/h. This agrees favourably with the measured amount of natural ventilation in the house.

In order to illustrate the increase of the CO₂ content an example below shows the increase of the CO₂ content in house B2. The CO₂ content is calculated using the following equation.

$$c = q/nv (1 - e^{-nt}) + c_0 e^{-nt}$$

where c = CO₂ concentration at time t , n = air change rate (changes/h), t = time (h), q = exhaled CO₂ content in m³/h, v = room volume (m³), and c_0 = background concentration of CO₂ in the room.

The calculations assume that the room is occupied by two adults and one child, that the door is closed and that a person at rest exhales 20 l CO₂/h at rest. The corresponding figure for a child at rest is 10 l CO₂/h.

Figures 4 and 5 show the CO₂ content variation with time in type A and B2 houses for different air change rates in the master bedroom, with closed door, when occupied by two sleeping adults and one child.

Moisture content increase

A person gives off approximately 40 g of water vapour per hour at rest. If we assume that two adults and a child sleep in the master bedroom, the vapour gain will be approximately 100 g/h (40 + 40 + 20). There may be other moisture sources which can increase moisture emission even further, but they are considered to be minor.

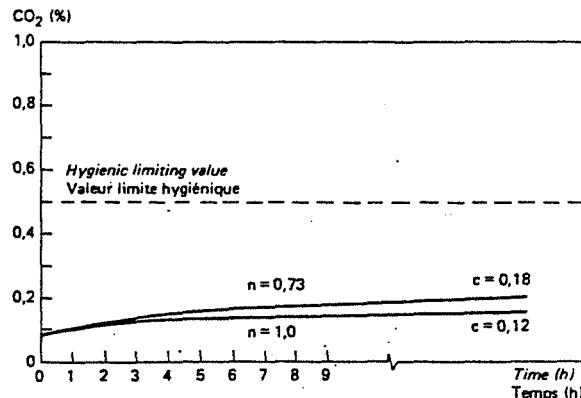


Figure 4
Build up of CO₂ content in indoor climate in type A houses remains well below permitted limits

La teneur en CO₂ accumulé à l'intérieur dans les maisons de type A reste largement en dessous des limites permises

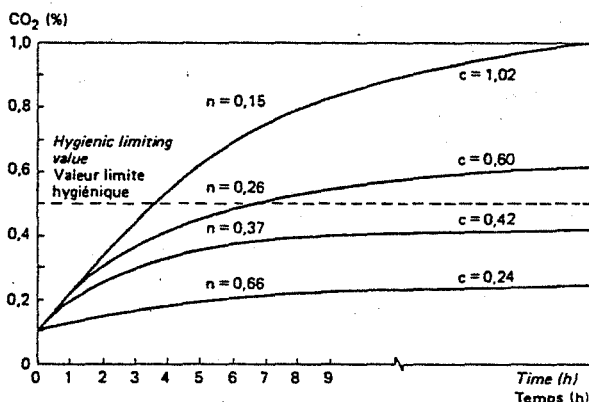


Figure 5
In type B houses, the hygiene limits of CO₂ are exceeded if the slot air valve is closed in the bedroom, both at basic exhaust fan speed and at an air change rate corresponding to building code requirements. At an air change rate of 0.15, the CO₂ content becomes an unacceptable 1.02 per cent. (Assumes an initial value of 0.08 per cent CO₂ during the day)

Dans les maisons de type B, les limites conformes à l'hygiène de CO₂ sont dépassées si la bouche d'insufflation est fermée dans la chambre, à la fois pour la vitesse de base du ventilateur d'extraction et pour un taux de renouvellement d'air correspondant aux exigences du Règlement de construction. Pour un taux de renouvellement d'air de 0,15 N, la teneur en CO₂ s'élève au taux inadmissible de 1,02 % (prise comme hypothèse, une valeur initiale de 0,08 % de CO₂ pendant le jour)

The increase in the moisture content in the room is dependent on how well the room is ventilated. Figures 6-7 show how the moisture content increases over time for type A and B2 houses where the outdoor temperature is 0 °C and where the outdoor humidity is 80 per cent. The calculations have been made using the same method as for calculating the CO₂ content above.

Table 11 Air change rate for different fan settings in master bedroom

House	Fan Setting	Air change rate measured in bedroom	
		m ³ /h	changes/h
A	Fan setting according to Swedish Building Code (0.35 l/s m ²) approx 0.5 changes/h in the whole house, slot air valve open	29.5	1.0
	Fan setting according to Swedish Building Code (0.35 l/s m ²) approx 0.5 changes/h in the whole house, slot air valve closed	21.6	0.73
Note : The slot air valve in type A cannot be closed completely whereas it can in house B			
B2	Fan set at base speed approx 0.25 changes/h in the whole house, slot air valve closed	5	0.15
	Fan set according to Swedish Building Code (0.35 l/s m ²) approx 0.5 changes/h in the whole house, slot air valve closed	8.4	0.26
	Fan set at base speed approx 0.25 changes/h in the whole house, slot air valve open	12.2	0.37
	Fan set according to Swedish Building Code (0.35 l/s m ²) approx 0.5 changes/h in the whole house, slot air valve open	19.6	0.66

The values indicate the upper limit for moisture content in the bedroom. The presence of absorbent material in the room reduces the calculated value somewhat. All the calculations are based on the values shown in table 11. The initial values in figures 6-7 indicate the moisture content at steady state conditions with an average moisture gain in the whole house of 3.0 g/m³ with an air change rate of 0.5 changes/h.

Figures 6-7 also indicate that the moisture content of the air in the master bedroom in house B2 becomes unacceptably high with the slot air valve closed. When the valve is open the values become acceptable in the master bedrooms of both type A and type B houses.

Since most of the slot air valves available on the market today for single family dwellings can be closed completely, it is quite probable that many people close them during the winter period in the hope of saving energy or to cut down 'draughts'. However, by closing the valves, the indoor climate deteriorates. Raising the moisture content over long periods can give rise to rust damage on windows and mould growth, for example behind cupboards up against external walls.

References/Bibliographie

CORNELL H. and LÖGDBERG A., 1978, Studie av klimatförhållanden Ventilationsomsättning och energiförbrukning i täta hus, Kungl. Tekniska Högskolan, Stockholm. Institutionen för byggnadsteknik.

ELMROTH A., 1978, Well Insulated Airtight Buildings. Design and Construction, Swedish Council for Building Research, Stockholm.

MUNTER K-E., 1974, Energy Consumption in Single-Family Houses. Report R58: 1974 from The Swedish Council for Building Research, Stockholm (The report is in Swedish).

Maisons étanches à l'air et consommation d'énergie

par Arne Elmroth et Arne Logdberg

Un supplément d'isolation et des structures étanches peuvent-elles réduire considérablement les demandes d'énergie ? Ces questions sont considérées ici par des ingénieurs du département Technologie du Bâtiment du Royal Institute of Technology de Stockholm, après qu'ils aient étudié la performance de maisons individuelles construites en conformité avec le nouveau Règlement national. Un modèle construit sur le chantier a permis, selon les estimations de réduire d'un tiers la consommation d'énergie ; mais une autre maison, préfabriquée, mais étanche à l'air a révélé des défauts graves dans le climat intérieur obtenu.

Dans le Règlement de construction suédois de 1975, les exigences relatives à l'isolation thermique de différentes parties de bâtiments ont été considérablement renforcées et des exigences complètement nouvelles concernant l'étanchéité des bâtiments y ont été introduites. Le climat intérieur — la qualité de l'air essentiellement — et la consommation d'énergie ont été étudiés dans un certain nombre de maisons isolées, situées dans un lotissement. Toutes ces maisons étaient très étanches et avaient, lors des essais de pression, un taux de renouvellement d'air inférieur à 1 volume/heure (N) sous 50 Pa.

La consommation moyenne pour les cinq maisons était, pour une période d'un an, de 18 700 kWh. La valeur correspondante pour une maison similaire (maison avec lucarnes d'environ 140 m² de surface habitable), construite avant les nouvelles exigences, est d'environ 28 000 kWh, ce qui met bien en évidence la diminution considérable de la consommation d'énergie à la suite de l'amélioration de l'isolation thermique et de l'étanchéité.

Deux autres maisons (maisons de type B) qui, une fois achevées, avaient des fuites d'air d'environ 3,0 N sous 50 Pa mesurées au manomètre et sous une pression négative ont également été examinées lors de l'étude du climat intérieur (les maisons des deux types A et B sont équipées de systèmes d'extraction mécanique de l'air). Le taux de renouvellement de l'air dans la chambre principale était très faible (5 m³/h), si le ventilateur était réglé au plus bas et le système d'admission d'air (bouches d'insufflation en forme de fente dans la pièce), fermé. D'un point de vue hygiénique, le taux de renouvellement d'air devrait être au moins de 25 m³/h. Dans les maisons plus étanches (type A), on a obtenu un taux bien meilleur.

Les mesures indiquent que l'on peut parvenir à un climat intérieur acceptable dans toutes les parties de la maison, si les maisons sont étanches, si les bouches d'insufflation en forme de fente sont ouvertes et le ventilateur réglé sur une position qui correspond à un taux de renouvellement d'air dans l'ensemble de la maison d'environ 0,5 N. Les maisons qui ont une ventilation avec extraction d'air et qui ne sont pas suffisamment étanches comportent le risque qu'un débit d'air irrégulier soit obtenu, entraînant une ventilation insuffisante de certaines pièces, aussi bien du point de vue hygiénique que technique.

Les coûts supplémentaires sont estimés approximativement comme suit :

— Etanchéité à l'air : KrS. 5 000, soit £ 500 ou FF 5 000

— Supplément d'isolation thermique :

70 mm dans les murs } KrS 22 000
100 mm dans la toiture } soit £ 2 200 ou FF 22 000
fenêtres à triple vitrage }

Rappels des exigences antérieures

Les exigences normatives antérieures concernant l'isolation thermique et l'étanchéité à l'air de la structure extérieure ont été, en Suède, influencées par l'hygiène ou le confort. Il y a eu des exigences relatives à l'isolation thermique mais, par contre, aucune concernant l'étanchéité des bâtiments.

Dans le Règlement de construction de 1975, les exigences relatives à l'isolation thermique de différentes parties de bâtiments ont été considérablement renforcées. Par exemple, celles relatives à l'isolation thermique prescrivent, dans le cas des murs en bois avec isolation en laine minérale, une épaisseur de l'isolant d'environ 150-190 mm (selon l'emplacement géographique de la maison) et, dans les plafonds sous comble, une épaisseur de laine minérale de 220-260 mm. Ce sont là des épaisseurs importantes qui signifient des ouvrages murs-solives plus compliqués qu'auparavant.

Des exigences totalement nouvelles relatives à l'étanchéité à l'air des bâtiments ont également été introduites. Cette nouvelle réglementation a pour but d'empêcher une ventilation naturelle trop importante à travers l'enveloppe extérieure des bâtiments. Le Règlement contient désormais une recommandation

Ces mesures ont été effectuées avec le ventilateur réglé à sa vitesse de base, à 50 et 100 % de sa capacité totale. Lorsque le ventilateur est réglé à sa vitesse de base, on obtient dans toute la maison un taux de renouvellement d'air d'environ 0,25 N. La capacité maximale est conçue pour être utilisée au moment de la préparation des repas. On a procédé à ces mesures en deux occasions différentes, avec des vitesses de vent différentes. Dans le premier cas, la vitesse du vent était élevée (environ 10-12 m/s, vent du sud) et modérée dans le deuxième cas (environ 3-6 m/s, vent du sud-est). Dans l'un et l'autre cas, la température était d'environ 0 °C à l'extérieur et 20 °C à l'intérieur.

Les tableaux 2 et 3 donnent des exemples de résultats de mesures dans une maison de type A.

Tableau 2 Résultats des mesures de pression de l'air dans des maisons de type A, essai 1 (bouches d'insufflation en forme de fente ouvertes). Toutes les valeurs indiquent que la pression de l'air est plus faible à l'intérieur qu'à l'extérieur. Vitesse du vent 10-12 m/s (S)

Façade	Différence de pression (Pa) avec ventilateur réglé sur		
	Vitesse de base	50 % de sa capacité totale	100 % de sa capacité totale
Façade longue, living-room orientation nord (côté sous le vent)	1-2, 5	4-6	10-11
Façade longue, porte extérieure, orientation sud (côté au vent)	5-6	9-11	19-22

Tableau 3 Résultats des mesures de pression de l'air dans des maisons de type A, essai 2 (bouches d'insufflation en forme de fente ouvertes). Toutes les valeurs indiquent que la pression de l'air est plus faible à l'intérieur qu'à l'extérieur. Vitesse du vent 3-6 m/s (SE)

Façade	Différence de pression (Pa) avec ventilateur réglé sur		
	Vitesse de base	50 % de sa capacité totale	100 % de sa capacité totale
Façade longue, living-room orientation nord (côté sous le vent)	2-4	4-6	8-12
Façade longue, porte extérieure, orientation sud (côté au vent)	4-5	4-6	12-14
Étage supérieur, orientation ouest	1-2	4	8-12
Étage supérieur, orientation est	0-1	1-2	5-6

Toutes ces mesures indiquaient qu'il y avait, dans la maison, une pression négative. La différence de pression changeait immédiatement dès que l'on augmentait ou diminuait la vitesse du ventilateur. Il n'a été mesuré aucune différence de pression entre les étages supérieurs dans les maisons soumises aux essais. Il est intéressant de constater que, pour une vitesse de vent aussi forte que 10-12 m/s, il y avait une pression négative aussi bien du côté au vent que du

côté sous le vent dans les maisons de type A avec ventilateur réglé sur vitesse moyenne. (Ces pressions étaient respectivement de 5 et 2 Pa) (cf. tableaux 2 et 3).

Les résultats de ces mesures de différences de pression indiquent clairement que la ventilation est contrôlée d'une manière appréciable par le réglage du ventilateur d'extraction d'air. Le climat extérieur n'a qu'une influence marginale sur la ventilation dans les maisons étanches à l'air.

Consommation d'énergie

La consommation d'énergie, au cours d'une année normale, a été estimée en enregistrant la consommation d'énergie, le taux de renouvellement d'air, la différence de pression entre l'extérieur et l'intérieur et le rayonnement solaire éventuel pendant quelques périodes de mesure relativement courtes (16-19 heures). A partir de ces enregistrements, il est possible d'extrapoler les déperditions thermiques et de ventilation pour des périodes plus longues. Ce type de calcul peut être effectué, à condition que les maisons soient inoccupées et que les conditions atmosphériques extérieures soient stables à la fois pendant les essais et pendant une certaine période avant que ces essais ne commencent.

La consommation d'énergie pour l'eau chaude et l'électricité à usage domestique dans des maisons occupées a été tirée d'un rapport de Munter (1974), ainsi que les valeurs estimées de la proportion d'énergie utilisée se rapportant aux pertes directes. Les apports d'énergie dus au rayonnement solaire ont été estimés, en gros, à 3 200 kWh/an.

Le tableau 4 donne le nombre total de degrés-heures pour Stockholm en fonction de différentes températures intérieures.

Tableau 4 Degrés-heures calculés pour Stockholm, en utilisant les chiffres normaux du climat extérieur, pour différentes températures intérieures pendant la période de chauffage, que l'on considère comme débutant lorsque la température moyenne diurne descend en dessous de + 12 °C et se termine lorsqu'elle monte à niveau au-dessus de + 10 °C

Température intérieure °C	Degrés-heures °C h
20	110 000
19	103 000
18	97 000

concernant la perméabilité maximale pour l'ensemble du bâtiment sous une différence de pression de 50 Pa par rapport à l'air extérieur (cf. tableau 1).

Tableau 1 Nombre maximal de renouvellements d'air autorisés dans un bâtiment achevé

	1 ^{er} juillet 1977- 30 juin 1978 (N)	Après le 1 ^{er} juillet 1978 (N)
Maison isolée ou en bandes	4,5	3,0
Autres bâtiments de 2 étages au moins ..	3,0	2,0
Bâtiments de 3 étages	1,5	1,0

Pour construire des maisons qui satisfassent à ces normes, il est nécessaire d'accorder la plus extrême attention aux problèmes d'étanchéité, en particulier à la formation des différentes parties de la construction et, surtout à la façon dont la pose des gaines de service — électricité, chaleur et ventilation — doit être effectuée (fig. 1).

Objectifs

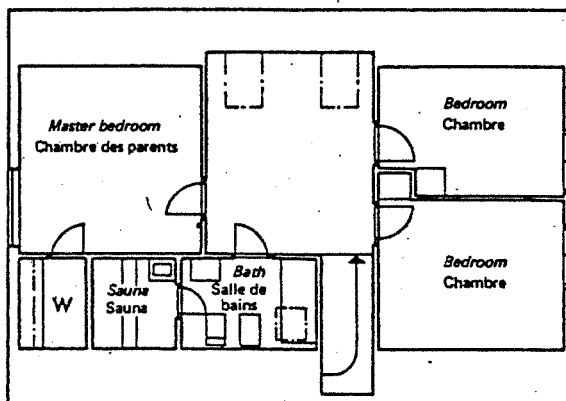
On a étudié, dans un certain nombre de maisons situées dans un lotissement, la façon dont une très bonne étanchéité à l'air ainsi qu'une bonne isolation thermique jouent sur le climat intérieur — qualité de l'air essentiellement. Au cours des essais de pression, toutes ces maisons avaient, immédiatement après leur construction, un taux de renouvellement d'air de 1 N sous une différence de pression de 50 Pa. A fin de comparaison, on a également étudié le climat dans un certain nombre de maisons qui, au cours de ces essais de pression, avaient eu un taux d'environ 3 N sous une différence de pression de 50 Pa. De plus, on a pu déterminer les modifications survenant dans l'étanchéité des maisons au cours des premières années.

Maisons de type A

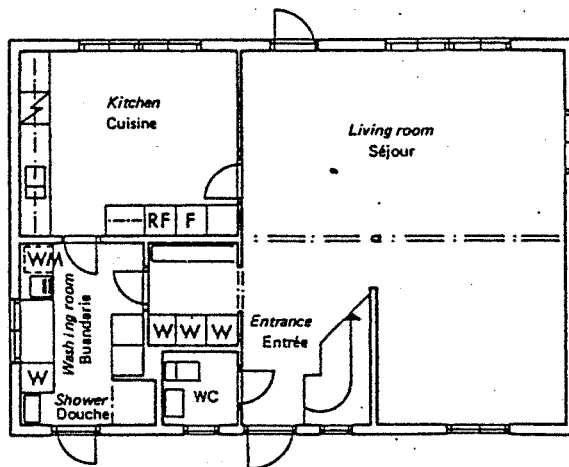
Ces maisons sont conçues et construites sur le chantier par Byggnads AB Folkhem, Stockholm (fig. 2). Elles sont toutes du même type et situées dans un lotissement à environ 40 km à l'est de Stockholm.

Au cours de l'établissement du projet, les responsables ont fait des efforts considérables pour parvenir à de bonnes solutions de construction. De plus, des exigences sévères ont été établies concernant le processus des travaux, et, en particulier, les travaux d'isolation thermique et d'étanchéité à l'air sur le chantier de construction. Toutes ces maisons ont été soumises à des essais de pression avant occupation et toutes avaient une perte d'air inférieure à 1 N sous 50 Pa par rapport à l'extérieur et sous une pression négative dans la maison. L'Institut de Technologie du Bâtiment du Royal Institute of Technology a suivi de près toutes les opérations de construction (Elmroth A, 1978). Ces maisons sont donc très étanches.

Le système de ventilation est un système par extraction d'air, contrôlé par ventilateur. L'air est



First floor
Premier étage



Entrance floor
Entrée

Figure 2
Close up garden view of the site-built house type A and floor layout

Vue de près, prise de derrière, de la maison de type A construite sur le chantier et plan des étages

introduit par des dispositifs spéciaux (bouches d'insufflation en forme de fente) dans le haut des vitrages. Ces dispositifs peuvent être réglés mais ne peuvent fermer complètement. Les maisons sont bâties sur des dalles et comportent des lucarnes.

Différences de pression

Pour vérifier si le ventilateur dans la maison pourrait créer une pression négative dans toute la maison, on a mesuré la différence de pression par rapport à l'air extérieur sur les différentes façades.

Lors des calculs de la consommation d'énergie pour la ventilation pendant un an, on a estimé le taux de renouvellement d'air respectivement à 0,25 N et à 0,5 N. La raison en est que beaucoup d'occupants règlent normalement le ventilateur à environ 0,25 N alors que, selon le Règlement de construction suédois, le taux devrait être de 0,5 N.

Pertes théoriques par transmission

Le calcul des coefficients k a été effectué en conformité avec le Règlement de construction suédois de 1975, et de façon à inclure la surface totale des éléments de l'ossature, hourdis, charpentes en bois porteuses, chainages, etc. (cf. tableau 5).

Tableau 5 Coefficient k calculé, surfaces et pertes par transmission par °C à travers différentes parties du bâtiment dans des maisons de type A

Partie de la maison	Coefficient k (W/m ² . °C)	Surface (m ²)	k x A (W/°C)
Plancher sur vide sanitaire	0,29	77,2	22,39
Murs extérieurs	0,28	206,0	29,68
Toit	0,16	35,0	5,53
Parties en pente de la toiture	0,19	57,1	10,68
Fenêtres	1,90	20,4	38,76
Portes	0,95	5,0	4,75
		Σ k x A =	111,71

Les pertes globales par transmission pendant l'année et pour 110 000 degrés-heures s'élèvent à 12 288 kWh. Les pertes calculées basées sur des mesures à court terme, s'élèvent à 13 100 kWh. La différence n'est donc que de 812 kWh. Ces chiffres témoignent d'une bonne concordance, ce qui indique que, dans les maisons étanches où l'on peut compter que le taux de renouvellement d'air est relativement constant pendant l'année, les mesures à court terme pour le calcul de la consommation d'énergie donnent de bons résultats.

Le tableau 6 montre le bilan énergétique calculé pendant une année normale pour une maison de type A. La température intérieure a été estimée à + 20 °C et le taux de ventilation moyen à 0,5 N. Les pertes par transmission ont été calculées en utilisant les résultats des mesures à court terme. Le tableau 7 indique comment la consommation d'énergie se modifie en fonction des changements qui interviennent dans la température et la ventilation.

Tableau 6 Bilan énergétique d'une maison de type A pour une année normale, dans les conditions climatiques de Stockholm avec une température intérieure de + 20 °C et un taux moyen de ventilation de 0,5 N

Pertes d'énergie	
transmission.....	13 100 kWh
ventilation.....	6 700
électricité domestique	1 000
écoulement des eaux..... (eau chaude)	3 500
Pertes totales d'énergie	24 300 kWh
Apports d'énergie	
chaufferie.....	11 000 kWh
chauffage de l'eau	5 000
électricité domestique	3 500
rayonnement solaire.....	3 200
chaleur corporelle.....	1 500
	} énergie gratuite
Energie totale fournie.....	24 300 kWh
Energie totale achetée	19 500 kWh

Tableau 7 Demande escomptée d'énergie achetée en fonction de températures intérieures et de taux de ventilation différents

Température intérieure (°C)	Taux de ventilation (N)	Energie achetée kWh
20	0,5	19 600
	0,25	16 200
19	0,5	18 400
	0,25	15 200
18	0,5	17 200
	0,25	14 200

Consommation calculée et mesurée

La consommation totale d'énergie a été relevée sur les compteurs d'électricité de ces cinq maisons. La température intérieure a été vérifiée un certain nombre de fois pendant l'année. Les occupants ont

Tableau 8 a Consommation d'énergie calculée et mesurée entre février 1978 et février 1979

Maison	Température intérieure mesurée (°C)	Taux de renouvellement d'air mesurée (N)	Consommation d'énergie (kWh/an)	
			calculée	mesurée
A1	19-20	0,35	17 100-18 000	17 900
A2	20-21	0,50	19 600-20 500	19 450
A3	17-18	0,50	16 100-17 100	16 000
A4	20-21	0,50	19 600-20 500	20 500
A5	19-20	0,50	18 400-19 600	18 900
			Moyenne 18 500	

Tableau 8 b *Consommation d'énergie calculée et mesurée entre février 1979 et février 1980*

Maison	Température intérieure mesurée (°C)	Taux de renouvellement d'air mesuré (N)	Consommation d'énergie (kWh/an)	
			calculée	mesurée
A1	19-20	0,45	18 600-19 400	20 800
A2	19-20	0,35	17 100-18 000	18 500
A3	18-19	0,50	17 200-18 600	16 900
A4	20-21	0,50	19 600-20 500	20 400
A5	18-19	0,50	17 200-18 600	17 400
			Moyenne 18 800	

assuré qu'ils ne modifiaient pas le réglage des thermostats des radiateurs électriques. La quantité d'air extrait a été mesurée à chaque occasion qui se présentait de relever le compteur électrique et a été estimé être constante pendant l'année.

Les tableaux 8 a et 8 b indiquent la consommation réelle d'énergie sur une période de deux ans par rapport à la consommation calculée (comme dans le tableau 6).

Ces résultats indiquent que les consommations mesurées d'énergie concordent parfaitement avec les chiffres obtenus par les calculs. Lorsque l'on connaît la température intérieure et le taux de ventilation, il est possible de calculer la consommation annuelle d'énergie avec une exactitude raisonnable et sans grande difficulté. Des modes de vie différents (consommation d'eau chaude, électricité à usage domestique) peuvent expliquer les différences que l'on remarque entre les consommations mesurées et calculées.

Dans les maisons bien isolées, étanches, on ne constate aucun changement spectaculaire dans la consommation d'énergie à moins que la température annuelle moyenne au cours de l'année soit nettement inférieure ou supérieure à la valeur normale. Les résultats indiquent, en outre, que la ventilation naturelle est faible et ne varie que de façon insignifiante en fonction des conditions climatiques extérieures.

Contrôle de l'étanchéité

Le Règlement de construction suédois recommande, pour les habitations unifamiliales isolées, une étanchéité à l'air de 3,0 N sous une pression négative ou par rapport à l'extérieur de 50 Pa. Les cinq maisons décrites ci-dessus avaient toutes une étanchéité de moins de 1,0, une fois achevées.

Une exigence concernant la construction est que l'étanchéité des maisons reste constante. Des mesures de pression ont donc été effectuées à l'Institut pour voir si des modifications intervenaient avec le temps. Le tableau 9 montre les résultats de ces vérifications.

Ces chiffres indiquent à l'évidence une augmentation relativement importante des fuites d'air après un an d'occupation des maisons. Au cours des derniers essais, aucune autre modification n'est intervenue (les valeurs sont dans la fourchette d'exactitude des appareils de mesure). La raison de cette augmentation considérable constatée en 1979 est sans doute le fait que la maison a séché, au cours de cette première

Tableau 9 *Résultats des essais de pression sur 3 ans*

Maison	Taux de renouvellement d'air, renouvellement horaire, avec une différence de pression de 50 Pa lors des essais de pression en		
	octobre 1977	février 1979	février 1980
A1	0,8	1,6	1,5
A2	0,7	1,1	1,2
A3	0,7	1,5	1,4
A4	0,7	1,0	1,1
A5	0,8	1,2	1,3

année, d'où apparition probable de petites fissures, essentiellement entre les murs extérieurs et les structures à solives.

On constate, par contre, d'après ces essais de pression, que l'étanchéité reste constante, une fois le séchage de la maison terminé.

Climat intérieur

Une étude du climat intérieur a montré, entre autres, que deux maisons du type B avaient, une fois achevées, une fuite d'air de 3,0 N sous une pression négative et par rapport à l'extérieur de 50 Pa (à comparer avec les maisons de type A < 1,0 N).

Ces maisons de type B sont préfabriquées en deux composants et huit éléments de toiture, elles ont également des fondations accessibles. Elles aussi comportent des lucarnes (fig. 3).

Le système d'extraction d'air est contrôlé par un ventilateur. L'air arrive par des systèmes d'entrée d'air spéciaux (bouches d'insufflation en forme de fente) situés en haut des châssis des fenêtres. On peut régler ces bouches mais pas les fermer complètement.

Taux de renouvellement d'air

Des mesures au gaz traceur ont été effectuées pour contrôler le taux de renouvellement d'air dans des pièces individuelles occupées par des gens pendant de longues périodes (chambres à coucher par exemple).

Dans les maisons ventilées grâce à un système d'extraction, il n'y a, en général, aucun dispositif d'extraction dans les chambres à coucher, les bureaux, etc. ; il n'y en a que dans les pièces humides (salles de bain, toilettes, etc.) et les cuisines. L'air « vicié » est extrait par les dispositifs d'extraction dans ces zones, tandis que l'air extérieur pénètre dans la maison par

Des dispositifs d'entrée (bouches d'insufflation) généralement situés au-dessus des fenêtres dans les pièces non équipées de systèmes d'extraction. Une certaine quantité d'air arrive également par les points de fuite dans la maison.

Le débit d'air extrait est souvent réglé par un système de commande général posé sur la hotte de la cuisinière. Le ventilateur d'extraction est normalement situé dans un conduit de ventilation au-dessus du toit.

Le ventilateur est réglé de telle sorte que le débit moyen corresponde au taux de renouvellement d'air (l/s) donné dans le Règlement de construction suédois pour chaque pièce humide prise individuellement et pour la cuisine. Le taux minimal de renouvellement d'air pour toute la maison ne doit pas, cependant, être inférieur à 0,35 l/s m², ce qui correspond à environ 0,5 N pour l'ensemble de la maison. Il n'existe, dans le Règlement de construction suédois, aucune indication concernant un taux de renouvellement minimal pour les pièces prises individuellement ; il est simplement spécifié qu'« un inconfort hygiénique ne doit pas survenir ».

D'un point de vue hygiénique, un taux de renouvellement d'air de 4 m³ par personne et par heure, à 18 °C et une teneur en humidité relative de 60 % est le taux de renouvellement minimal pour assurer que l'air ne contiendra pas plus de 0,5 % de CO₂ (valeur maximale permise sur des lieux de travail par le National Board of Occupational Safety and Health de Suède). Il n'existe pas de valeur correspondante pour les logements. En tenant compte d'exigences, telles odeurs, valeur d'humidité relative dans la pièce qui ne soit pas trop élevée et évaporation conditionnée par les matériaux, radon y compris, un taux de renouvellement d'air de 10 m³ par personne et par heure est une valeur limite plus appropriée (voir Ubish 1977). Cela signifie que, dans la chambre à coucher des parents, un taux de ventilation d'environ (10 + 10 + 5) = 25 m³/heure est nécessaire si deux adultes et un enfant y dorment.

Dans toutes les maisons étudiées, il était très facile pour l'occupant individuel de régler le ventilateur — et donc le taux de renouvellement d'air total dans la maison. Dans les maisons de type A, le réglage de base du ventilateur — ou vitesse de base (réglage minimal du ventilateur) a été fait de telle sorte que le taux de renouvellement d'air total dans la maison soit d'environ 0,5 N, ventilation naturelle comprise. Le taux moyen de renouvellement d'air à la vitesse de base dans les maisons de type B était de 0,23 - 0,26 N pour l'ensemble de la maison, ventilation naturelle comprise. Il est bon d'avoir une « vitesse de base » qui donne environ 0,25 N dans les maisons de type B, car il devrait être possible, pendant le jour ou pendant une absence plus longue hors de la maison, de réduire la ventilation et donc la consommation d'énergie. Il n'y a pas de position qui indique quand les maisons ont un taux de renouvellement d'air d'environ 0,5 N dans les maisons de type B.

On a pu se rendre compte que les occupants, dans l'ensemble, réglaient presque toujours le ventilateur sur sa position minimale afin d'économiser l'énergie.

Le risque le plus grand d'être soumis à un climat intérieur inacceptable se produit dans les chambres à coucher qui sont occupées pendant des périodes plus

longues et qui n'ont pas de systèmes d'extraction. Les résultats des mesures donnés au tableau 2 indiquent le taux de renouvellement d'air dans les maisons de type A et B avec le ventilateur réglé sur la vitesse de base et conformément à la recommandation du Règlement de construction suédois (environ 0,5 N). Les mesures ont été effectuées avec la bouche d'insufflation ouverte ou fermée. Elles se rapportent à une chambre principale d'environ 13 m². Les portes menant aux autres chambres étaient maintenues fermées.

Le tableau 10 montre clairement que, seules, les maisons de type A ont un taux de renouvellement d'air qui correspond à la valeur recommandée de 25 m³/heure. Dans les maisons de type B, avec ventilateur réglé au minimum, la valeur descendait à environ 5,0 m³/h avec bouche d'insufflation fermée. Cette valeur est totalement inacceptable d'un point de vue hygiénique et provoque une augmentation de l'HR et de la teneur en CO₂. Les résultats montrent également que les bouches d'insufflation ont une influence décisive sur le taux de renouvellement d'air dans les pièces. Pour cette raison, il ne doit pas être possible de les fermer complètement.

Tableau 10 Taux de renouvellement d'air pour différents réglages du ventilateur dans les chambres principales avec bouches d'insufflation respectivement ouvertes et fermées. Les portes des chambres étaient fermées (m³/h)

Réglage du ventilateur	Maison A	Maison B1	Maison B2	Valeur recommandée
Vitesse de base d'environ 0,25 N dans toute la maison (bouche d'insufflation fermée)	—	4,7	5	25
Vitesse de base d'environ 0,25 N dans toute la maison (bouche d'insufflation ouverte)	—	9,7	12,2	25
Comme prescrit par le Règlement de construction suédois, environ 0,5 N dans toute la maison (bouche d'insufflation fermée)	21,6	9,4	8,4	25
Comme prescrit par le Règlement de construction suédois, environ 0,5 N dans toute la maison (bouche d'insufflation ouverte)	29,5	18,5	19,6	25

Même lorsque le ventilateur était réglé pour correspondre aux valeurs citées dans le Règlement de construction suédois, on obtenait néanmoins des valeurs très faibles dans les maisons de type B (avec la bouche d'insufflation en forme de fente fermée). Cette valeur est approximativement la même qu'à la vitesse de base avec la bouche d'insufflation ouverte.

Teneur en CO₂

Dans les maisons de type B, des taux de renouvellement d'air très faibles ont été mesurés dans les chambres à coucher. La valeur mesurée la plus faible est 5 m³/h, ce qui correspond à un taux de renouvellement de 0,15 N. Ceci concorde avec la quantité mesurée de ventilation naturelle dans la maison.

Afin d'illustrer l'augmentation de la teneur en CO₂, un exemple ci-dessous, illustre l'augmentation de la teneur en CO₂ dans la maison B2. Cette teneur en CO₂ est calculée avec l'équation suivante :

$$c = q/nv (1 - e^{-nt}) + c_0 e^{-nt}$$

où c = concentration en CO₂ au temps t, n = taux de renouvellement d'air, t = temps (h), q = teneur en CO₂ expiré dans m³/h, v = volume de la pièce (m³), c₀ = concentration générale de CO₂ dans la pièce.

Les calculs prennent comme hypothèse que la pièce est occupée par deux adultes et un enfant, que la porte est fermée et qu'une personne au repos expire 20 l de CO₂/h au repos. Le chiffre correspondant pour un enfant au repos est 10 l CO₂/h.

Les figures 4 et 5 montrent la variation de la teneur en CO₂ avec le temps dans les maisons de type A et B2 pour différents taux de renouvellement d'air dans la chambre à coucher principale, porte fermée, occupée par deux adultes et un enfant endormis.

Augmentation de la teneur en eau

Une personne, au repos, produit environ 40 g de vapeur d'eau par heure. Si nous prenons comme hypothèse que deux adultes et un enfant dorment dans la chambre principale, l'apport de vapeur sera d'environ 100 g/h (40 + 40 + 20). Il peut exister d'autres sources d'humidité susceptibles d'augmenter encore l'émission de vapeur, mais on peut les considérer comme mineures.

L'augmentation de la teneur en eau dans la pièce dépend de la bonne ventilation ou non de la pièce. Les figures 6-7 montrent comment la teneur en eau

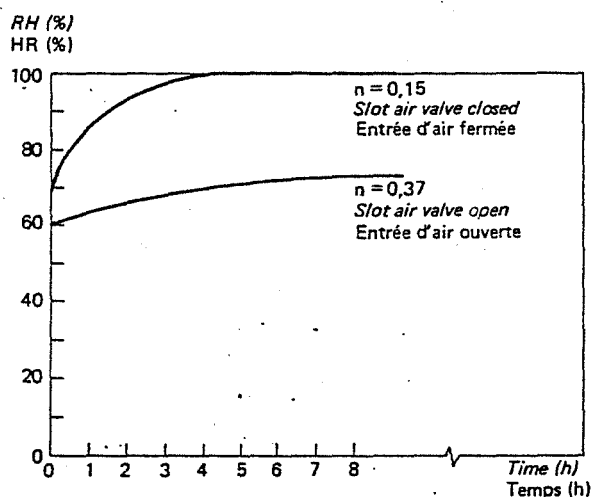


Figure 6 Increase in moisture content in master bedroom of house type B with slot air valves respectively closed and open. Fan set at approximately 0.25 air changes/h (basic speed). Indoor temperature 19 °C, outdoor temperature 0 °C, RH 80 per cent

Augmentation de la teneur en eau dans la chambre des parents de la maison de type B avec bouche d'insufflation respectivement fermée et ouverte. Ventilateur réglé à environ 0,25 N (vitesse de base). Température intérieure 19 °C, température extérieure 0 °C, HR 80 %

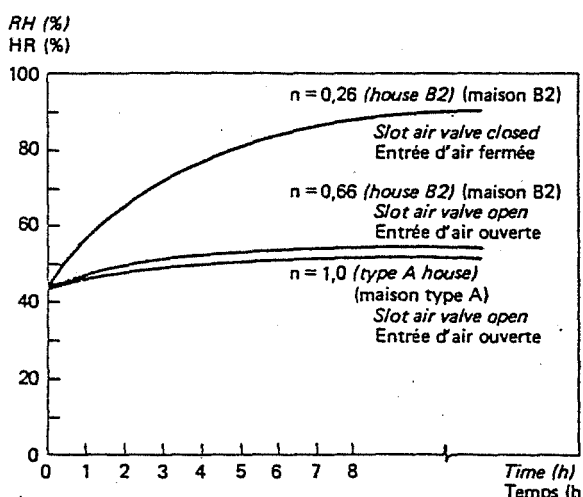


Figure 7 House types A and B compared for increase in moisture content in master bedroom with slot air valves open and closed. Fan setting at approximately 0.5 air changes/h (0.35 l/s m²), indoor temperature 19 °C and outdoor temperature 0 °C, RH 80 per cent

Comparaison des maisons de type A et B en ce qui concerne l'augmentation de la teneur en eau dans la chambre des parents avec les bouches d'insufflation ouvertes et fermées. Ventilateur réglé à environ 0,5 N (0,35 l/sm²), température intérieure 19 °C et température extérieure 0 °C, HR 80 %

augmente avec le temps pour les maisons A et B2 où la température extérieure est de 0° C, et l'humidité extérieure de 80 %. Ces calculs ont été effectués en utilisant la même méthode que pour le calcul de la teneur en CO₂ ci-dessus.

Les valeurs indiquent la limite supérieure pour la teneur en eau dans la chambre à coucher. La présence de matériaux absorbants dans la chambre réduit quelque peu la valeur calculée. Tous les calculs sont basés sur les chiffres donnés au tableau 11. Les valeurs initiales des figures 6-7 indiquent la teneur en eau dans des conditions de régime permanent avec un apport d'humidité moyen dans l'ensemble de toute la maison de 3,0 g/m³ avec un taux de renouvellement d'air de 0,5 N.

Les figures 6 - 7 indiquent également que la teneur en eau de l'air dans la chambre à coucher des parents dans la maison B2 devient inadmissible élevée avec la bouche d'insufflation fermée. Lorsqu'elle est ouverte, les valeurs deviennent admissibles dans les chambres à coucher des maisons de type A et de type B.

Etant donné que presque toutes les bouches d'insufflation disponibles sur le marché aujourd'hui pour des maisons unifamiliales peuvent être fermées complètement, il est tout à fait probable que beaucoup de gens les ferment pendant l'hiver dans l'espoir d'économiser l'énergie ou de réduire les « courants d'air ». Mais si l'on ferme ces bouches, le climat intérieur se dégrade. L'augmentation de la teneur en eau durant de longues périodes peut engendrer des dommages dus à la rouille sur les fenêtres ou le développement de moisissures derrière les placards posés sur les murs extérieurs.

Tableau 11 Taux de renouvellement d'air pour différents réglages dans la chambre à coucher des parents

Maison	Réglage du ventilateur	Taux de renouvellement d'air mesuré dans une chambre	
		m ³ /h	N
A	Réglage du ventilateur conforme au Règlement de construction suédois (0,35 l/s m ²) environ 0,5 N dans toute la maison, bouche d'insufflation ouverte	29,5	1,0
	Réglage du ventilateur conforme au Règlement de construction suédois (0,35 l/s m ²) environ 0,5 N dans toute la maison, bouche d'insufflation fermée Nota : la bouche dans la maison de type A ne peut être fermée complètement, au contraire de la maison de type B	21,6	0,73
B2	Ventilateur réglé sur vitesse de base, environ 0,25 N dans toute la maison, bouche d'insufflation fermée	5	0,15
	Ventilateur réglé conformément au Règlement de construction suédois (0,35 l/s m ²) environ 0,5 N dans toute la maison, bouche d'insufflation fermée	8,4	0,26
	Ventilateur réglé sur vitesse de base, environ 0,25 N dans toute la maison, bouche d'insufflation ouverte	12,2	0,37
	Ventilateur réglé conformément au Règlement de construction suédois (0,35 l/s m ²) environ 0,5 N dans toute la maison, bouche d'insufflation ouverte	19,6	0,66

the air change rate in the rooms. For this reason it should not be possible to close the slot air valve completely.

Even when the fan was set to correspond to the values quoted in the Swedish Building Code, very low values were, however, still obtained in type B houses (with the slot air valve closed). This value is approximately the same as at basic speed with the slot air valve open

CO₂ content

In type B houses, very low air change rates were measured in bedrooms. The lowest value measured is 5 m³/h, which corresponds to an air change rate of 0.15 changes/h. This agrees favourably with the measured amount of natural ventilation in the house.

In order to illustrate the increase of the CO₂ content an example below shows the increase of the CO₂ content in house B2. The CO₂ content is calculated using the following equation:

$$c = q/nv (1 - e^{-nt}) + c_0 e^{-nt}$$

where c = CO₂ concentration at time t , n = air change rate (changes/h), t = time (h), q = exhaled CO₂ content in m³/h, v = room volume (m³), and c_0 = background concentration of CO₂ in the room.

The calculations assume that the room is occupied by two adults and one child, that the door is closed and that a person at rest exhales 20 l CO₂/h at rest. The corresponding figure for a child at rest is 10 l CO₂/h.

Figures 4 and 5 show the CO₂ content variation with time in type A and B2 houses for different air change rates in the master bedroom, with closed door, when occupied by two sleeping adults and one child.

Moisture content increase

A person gives off approximately 40 g of water vapour

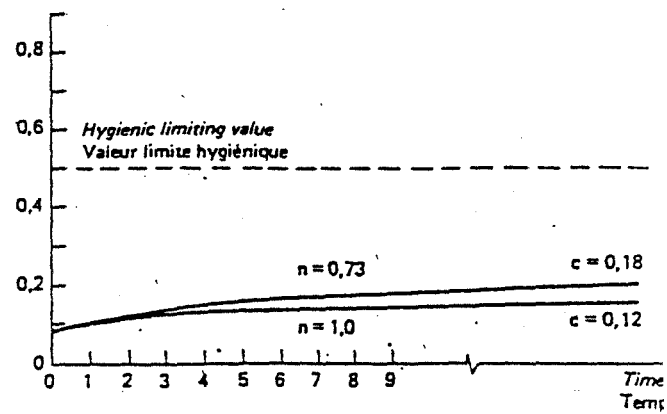


Figure 4

Build up of CO₂ content in indoor climate in type houses remains well below permitted limits

La teneur en CO₂ accumulé à l'intérieur dans maisons de type A reste largement en dessous limites permises

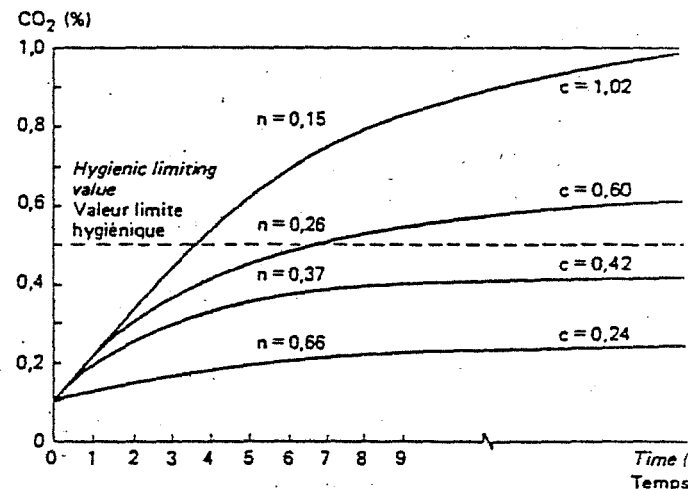


Figure 5

In type B houses, the hygiene limits of CO₂ are exceeded if the slot air valve is closed in the bedroom, both at basic exhaust fan speed and at an air change rate corresponding to building code requirements. At an air change rate of 0.15, the CO₂ content becomes unacceptable 1.02 per cent. (Assumes an initial value of 0.08 per cent CO₂ during the day)

Dans les maisons de type B, les limites conformes à l'hygiène de CO₂ sont dépassées si la bouche d'insufflation est fermée dans la chambre, à la fois pour la vitesse de base du ventilateur d'extraction et pour un taux de renouvellement d'air correspondant aux exigences du Règlement de construction. Pour un taux de renouvellement d'air de 0,15 N, la teneur en CO₂ s'élève au taux inadmissible de 1,02 % (prise comme hypothèse, une valeur initiale de 0,08 % de CO₂ pendant le jour)

The increase in the moisture content in the room is dependent on how well the room is ventilated. Figure

Table 11 Air change rate for different fan settings in master bedroom

House	Fan Setting	Air change rate measured in bedroom	
		m ³ /h	changes/h
A	Fan setting according to Swedish Building Code (0.35 l/s m ²) approx 0.5 changes/h in the whole house, slot air valve open	29.5	1.0
	Fan setting according to Swedish Building Code (0.35 l/s m ²) approx 0.5 changes/h in the whole house, slot air valve closed	21.6	0.73
Note : The slot air valve in type A cannot be closed completely whereas it can in house B			
B2	Fan set at base speed approx 0.25 changes/h in the whole house, slot air valve closed	5	0.15
	Fan set according to Swedish Building Code (0.35 l/s m ²) approx 0.5 changes/h in the whole house, slot air valve closed	8.4	0.26
	Fan set at base speed approx 0.25 changes/h in the whole house, slot air valve open	12.2	0.37
	Fan set according to Swedish Building Code (0.35 l/s m ²) approx 0.5 changes/h in the whole house, slot air valve open	19.6	0.66

The values indicate the upper limit for moisture content in the bedroom. The presence of absorbent material in the room reduces the calculated values somewhat. All the calculations are based on the values shown in table 11. The initial values in figures 6-7 indicate the moisture content at steady state conditions with an average moisture gain in the whole house of 3.0 g/m³ with an air change rate 0.5 changes/h.

Figures 6-7 also indicate that the moisture content of the air in the master bedroom in house B2 becomes unacceptably high with the slot air valve closed. When the valve is open the values become acceptable in the master bedrooms of both type A and type B houses. Since most of the slot air valves available on the market today for single family dwellings can be closed completely, it is quite probable that many people close them during the winter period in the hope of saving energy or to cut down 'draughts'. However, by closing the valves, the indoor climate deteriorates. Raising the moisture content over long periods can give rise to rust damage on windows and mould growth, for example behind cupboards and against external walls.

References/Bibliographie

- CORNELL H. and LÖGDBERG A., 1978, Studie av klimatförhållanden Ventilationsomsättning och energiförbrukning i tätta hus, Kungl. Tekniska Högskolan, Stockholm. Institutionen för byggnadsteknik.
- ELMROTH A., 1978, Well Insulated Airtight Buildings Design and Construction, Swedish Council for Building Research, Stockholm.
- MUNTER K-E., 1974, Energy Consumption in Single Family Houses, Report R58: 1974 from The Swedish Council for Building Research, Stockholm (The report is in Swedish).

étanches à l'air consommation d'énergie

Smith et Arne Logdberg

*l'isolation et des structures
elles réduire considérablement
l'énergie? Ces questions sont
des ingénieurs du départe-
ment du Bâtiment du Royal Institute
Stockholm, après qu'ils aient
l'analyse de maisons individuelles
construites avec le nouveau Règle-
ment modèle construit sur le chantier
des estimations de réduire d'un
tiers la consommation d'énergie; mais une autre
maison, étanche à l'air a révélé
dans le climat intérieur obtenu.*

Les mesures indiquent que l'on peut parvenir à un climat intérieur acceptable dans toutes les parties de la maison, si les maisons sont étanches, si les bouches d'insufflation en forme de fente sont ouvertes et le ventilateur réglé sur une position qui correspond à un taux de renouvellement d'air dans l'ensemble de la maison d'environ 0,5 N. Les maisons qui ont une ventilation avec extraction d'air et qui ne sont pas suffisamment étanches comportent le risque qu'un débit d'air irrégulier soit obtenu, entraînant une ventilation insuffisante de certaines pièces, aussi bien du point de vue hygiénique que technique.

Les coûts supplémentaires sont estimés approximativement comme suit :

— Etanchéité à l'air : KrS. 5 000, soit £ 500 ou FF 5 000

— Supplément d'isolation thermique :

70 mm dans les murs	} KrS 22 000
100 mm dans la toiture	
fenêtres à triple vitrage	

soit £ 2 200 ou FF 22 000

la construction suédoise de 1975, les mesures à l'isolation thermique de bâtiments ont été considérablement augmentées. Les exigences complètes de l'étanchéité des bâtiments y ont conduit à un climat intérieur — la qualité de l'air — et la consommation d'énergie. Dans un certain nombre de maisons d'un lotissement. Toutes ces maisons étaient étanches et avaient, lors des essais de renouvellement d'air inférieur à 50 Pa.

La moyenne pour les cinq maisons est de d'un an, de 18 700 kWh. La consommation pour une maison similaire est d'environ 140 m² de surface avant les nouvelles exigences, de 10 000 kWh, ce qui met bien en évidence un gain considérable de la consommation d'énergie de l'amélioration de l'isolation thermique et de l'étanchéité.

Les maisons de type B) qui, une fois étanches, ont des fuites d'air d'environ 3,0 N sous un anémomètre et sous une pression ont été examinées lors de l'étude des maisons des deux types A et B avec des bouches d'extraction mécanique de renouvellement de l'air dans la maison. Le débit était très faible (5 m³/h), si le débit était au plus bas et le système

Rappels des exigences antérieures

Les exigences normatives antérieures concernant l'isolation thermique et l'étanchéité à l'air de la structure extérieure ont été, en Suède, influencées par l'hygiène ou le confort. Il y a eu des exigences relatives à l'isolation thermique mais, par contre, aucune concernant l'étanchéité des bâtiments.

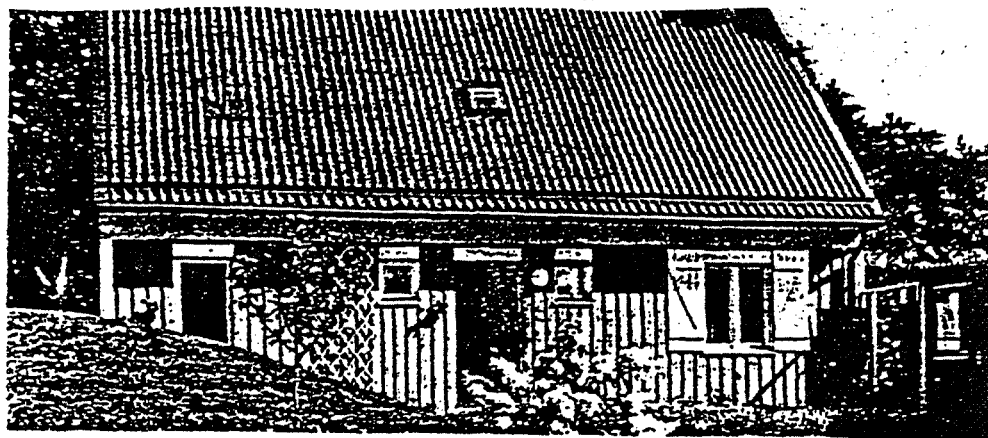
Dans le Règlement de construction de 1975, les exigences relatives à l'isolation thermique de différentes parties de bâtiments ont été considérablement renforcées. Par exemple, celles relatives à l'isolation thermique prescrivent, dans le cas des murs en bois avec isolation en laine minérale, une épaisseur de l'isolant d'environ 150-190 mm (selon l'emplacement géographique de la maison) et, dans les plafonds sous comble, une épaisseur de laine minérale de 220-260 mm. Ce sont là des épaisseurs importantes qui signifient des ouvrages murs-solives plus compliqués qu'auparavant.

Des exigences totalement nouvelles ont été introduites à l'éta-

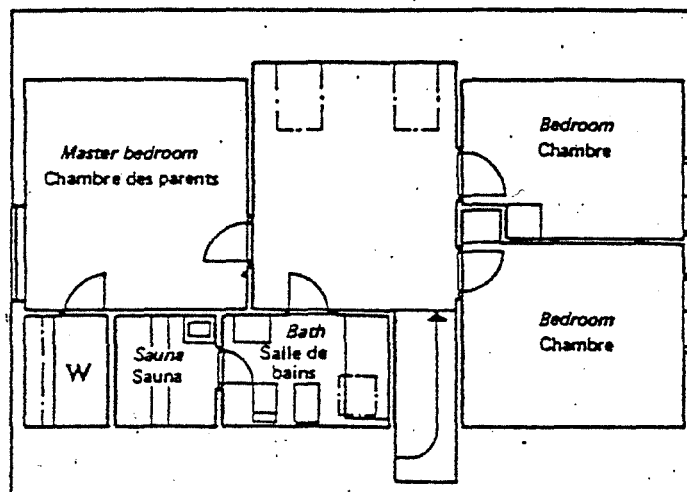
air extérieur (cf. tableau 1).

Le taux maximal de renouvellements d'air mesurés dans un bâtiment achevé

	1 ^{er} juillet 1977-30 juin 1978 (N)	Après le 1 ^{er} juillet 1978 (N)
en ... de ... ges	4,5	3,0
	3,0	2,0
	1,5	1,0

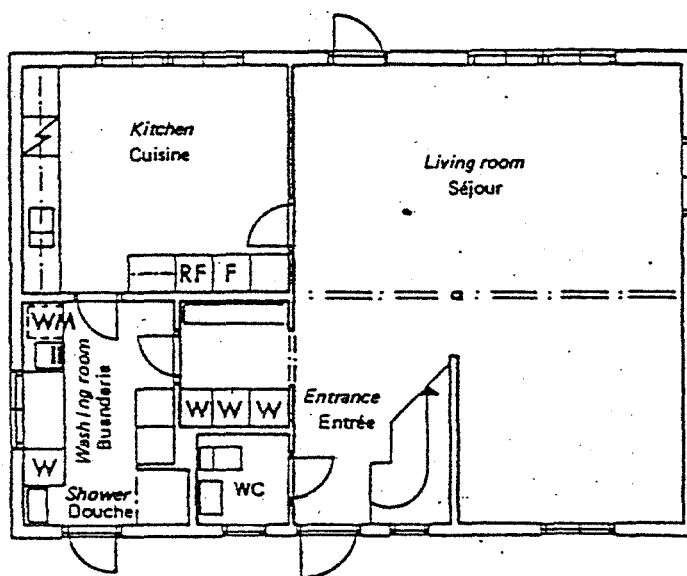


des maisons qui satisfassent à ces exigences, il est nécessaire d'accorder la plus extrême attention à l'étanchéité, en particulier à différentes parties de la construction dont la pose des gaines de service d'eau, de gaz et de ventilation — doit être soignée.



First floor
Premier étage

On a mesuré dans un certain nombre de maisons neuves, au moment de leur achèvement, la façon dont une très bonne isolation sur le climat intérieur — qualité de construction — affecte le climat intérieur. Au cours des essais de pression, on a mesuré, avant et après leur occupation, le taux de renouvellement d'air de 1 N sous une pression de 50 Pa. A la fin de ces essais, on a également étudié le climat dans un certain nombre de maisons qui, au cours de ces essais, avaient eu un taux d'environ 3 N sous une pression de 50 Pa. De plus, on a pu constater des modifications survenant dans l'étanchéité au cours des premières années.



Entrance floor
Entrée

Type A

Les maisons ont été conçues et construites sur le chantier de Folkhem, Stockholm (fig. 2). Elles sont du même type et situées dans un rayon d'environ 40 km à l'est de Stockholm.

À l'occasion de l'établissement du projet, les responsables ont fait de grands efforts considérables pour parvenir à une réalisation de construction. De plus, des mesures ont été établies concernant le climat intérieur, et, en particulier, les travaux de construction et d'étanchéité à l'air sur le chantier. Toutes ces maisons ont été soumises à des essais de pression avant occupation et ont montré une perte d'air inférieure à 1 N sous une pression de 50 Pa à l'extérieur et sous une pression de 50 Pa à l'intérieur de la maison. L'Institut de Technologie du

Figure 2

Close up garden view of the site-built house type A and floor layout

Vue de près, prise de derrière, de la maison de type A construite sur le chantier et plan des étages

introduit par des dispositifs spéciaux (bouches d'insufflation en forme de fente) dans le haut des vitrages. Ces dispositifs peuvent être réglés mais ne peuvent pas être fermés complètement. Les maisons sont bâties sur des dalles et comportent des lucarnes.

Différences de pression

l'air respectivement à 0,25 N et à en est que beaucoup d'occupants ont le ventilateur à environ 0,25 N. Règlement de construction suédois, norme de 0,5 N.

Pertes par transmission

Coefficients k a été effectué en Règlement de construction suédois pour inclure la surface totale des murs, toiture, hourdis, charpentes en bois, etc. (cf. tableau 5).

Coefficient k calculé, surfaces et pertes par transmission à travers différentes parties du bâtiment de type A

	Coefficient k (W/m ² . °C)	Surface (m ²)	k × A (W/°C)
toiture	0,29	77,2	22,39
.....	0,28	206,0	29,68
.....	0,16	35,0	5,53
de la			
.....	0,19	57,1	10,68
.....	1,90	20,4	38,76
.....	0,95	5,0	4,75
		Σ k × A = 111,71	

Pertes par transmission pendant l'année pleine s'élèvent à 12 288 kWh. Les pertes basées sur des mesures à court terme sont de 13 100 kWh. La différence n'est que de 812 kWh. Ces chiffres témoignent d'une précision de 6,6%, ce qui indique que, dans les conditions où l'on peut compter que le taux de ventilation est relativement constant pendant l'année, les mesures à court terme pour le calcul des pertes d'énergie donnent de bons résultats.

Entre le bilan énergétique calculé et mesuré, la consommation normale pour une maison de type A, la température intérieure a été estimée à + 20 °C et le taux de ventilation moyen à 0,5 N. Les pertes par transmission ont été calculées en utilisant les résultats à court terme. Le tableau 7 indique que la consommation d'énergie se modifie en fonction des changements qui interviennent dans la température intérieure et le taux de ventilation.

Tableau 6 Bilan énergétique d'une maison de type A pour une année normale, dans les conditions climatiques de Stockholm avec une température intérieure de + 20 °C et un taux moyen de ventilation de 0,5 N

Pertes d'énergie	
transmission.....	13 100 kWh
ventilation.....	6 700
électricité domestique	1 000
écoulement des eaux..... (eau chaude)	3 500
Pertes totales d'énergie.....	24 300 kWh
Apports d'énergie	
chaufferie	11 000 kWh
chauffage de l'eau	5 000
électricité domestique	3 500
rayonnement solaire.....	3 200
chaleur corporelle	1 500
	} énergie gratuite
Energie totale fournie.....	24 300 kWh
Energie totale achetée	19 500 kWh

Tableau 7 Demande escomptée d'énergie achetée en fonction de températures intérieures et de taux de ventilation différents

Température intérieure (°C)	Taux de ventilation (N)	Energie achetée kWh
20	0,5	19 600
	0,25	16 200
19	0,5	18 400
	0,25	15 200
18	0,5	17 200
	0,25	14 200

Consommation calculée et mesurée

La consommation totale d'énergie a été relevée sur les compteurs d'électricité de ces cinq maisons. La température intérieure a été vérifiée un certain nombre de fois pendant l'année. Les occupants ont

Consommation d'énergie calculée et mesurée entre février 1978 et février 1979

Température intérieure mesurée (°C)	Taux de renouvellement d'air mesurée (N)	Consommation d'énergie (kWh/an)	
		calculée	mesurée
19-20	0,35	17 100-18 000	17 900

Température intérieure mesurée (°C)	Taux de renouvellement d'air mesuré (N)	Consommation d'énergie (kWh/an)	
		calculée	mesurée
19-20	0,45	18 600-19 400	20 800
19-20	0,35	17 100-18 000	18 500
18-19	0,50	17 200-18 600	16 900
20-21	0,50	19 600-20 500	20 400
18-19	0,50	17 200-18 600	17 400
		Moyenne 18 800	

modifiaient pas le réglage des radiateurs électriques. La quantité mesurée à chaque occasion qui se ver le compteur électrique et a été ante pendant l'année.

et 8 b indiquent la consommation sur une période de deux ans par ommission calculée (comme dans le

quent que les consommations mesu- oncordent parfaitement avec les ar les calculs. Lorsque l'on connaît érieure et le taux de ventilation, il alculer la consommation annuelle ne exactitude raisonnable et sans

Des modes de vie différents eau chaude, électricité à usage ent expliquer les différences que re les consommations mesurées et

s bien isolées, étanches, on ne hangement spectaculaire dans la nergie à moins que la température au cours de l'année soit nettement érieure à la valeur normale. Les t, en outre, que la ventilation ple et ne varie que de façon nction des conditions climatiques

étanchéité

onstruction suédois recommande, is unifamiliales isolées, une étan-) N sous une pression négative ou érieur de 50 Pa. Les cinq maisons avaient toutes une étanchéité de fois achevées.

cernant la construction est que sons reste constante. Des mesures nc été effectuées à l'Institut pour tions intervenaient avec le temps. e les résultats de ces vérifications.

ent à l'évidence une augmentation ante des fuites d'air après un an

Tableau 9 Résultats des essais de pression sur 3 ans

Maison	Taux de renouvellement d'air, renouvellement horaire, avec une différence de pression de 50 Pa lors des essais de pression en		
	octobre 1977	février 1979	février 1980
A1	0,8	1,6	1,5
A2	0,7	1,1	1,2
A3	0,7	1,5	1,4
A4	0,7	1,0	1,1
A5	0,8	1,2	1,3

année, d'où apparition probable de petites fissures, essentiellement entre les murs extérieurs et les structures à solives.

On constate, par contre, d'après ces essais de pression, que l'étanchéité reste constante, une fois le séchage de la maison terminé.

Climat intérieur

Une étude du climat intérieur a montré, entre autres, que deux maisons du type B avaient, une fois achevées, une fuite d'air de 3,0 N sous une pression négative et par rapport à l'extérieur de 50 Pa (à comparer avec les maisons de type A < 1,0 N).

Ces maisons de type B sont préfabriquées en deux composants et huit éléments de toiture, elles ont également des fondations accessibles. Elles aussi comportent des lucarnes (fig. 3).

Le système d'extraction d'air est contrôlé par un ventilateur. L'air arrive par des systèmes d'entrée d'air spéciaux (bouches d'insufflation en forme de fente) situés en haut des châssis des fenêtres. On peut régler ces bouches mais pas les fermer complètement.

Taux de renouvellement d'air

Des mesures au gaz traceur ont été effectuées pour contrôler le taux de renouvellement d'air dans des pièces individuelles occupées par des gens pendant de longues périodes (chambres à coucher par exemple).

Dans les maisons ventilées grâce à un système

systemes d'extraction. Une certaine
ive également par les points de fuite

rait est souvent réglé par un système
général posé sur la hotte de la
entilateur d'extraction est normale-
n conduit de ventilation au-dessus du

st réglé de telle sorte que le débit
ide au taux de renouvellement d'air
e Règlement de construction suédois
ce humide prise individuellement et
Le taux minimal de renouvellement
a maison ne doit pas, cependant, être
l/s m², ce qui correspond à environ
mble de la maison. Il n'existe, dans
construction suédois, aucune indica-
un taux de renouvellement minimal
ises individuellement ; il est simple-
un inconfort hygiénique ne doit pas

e hygiénique, un taux de renouvelle-
t³ par personne et par heure, à 18 °C
humidité relative de 60 % est le taux
nt minimal pour assurer que l'air ne
plus de 0,5 % de CO₂ (valeur
e sur des lieux de travail par le
f Occupational Safety and Health de
e pas de valeur correspondante pour
n tenant compte d'exigences, telles
humidité relative dans la pièce qui ne
ée et évaporation conditionnée par
on y compris, un taux de renouvelle-
n³ par personne et par heure est une
appropriée (voir Ubish 1977). Cela
la chambre à coucher des parents,
ilation d'environ (10 + 10 + 5) =
écessaire si deux adultes et un enfant

maisons étudiées, il était très facile
ndividuel de régler le ventilateur —
e renouvellement d'air total dans la
maisons de type A, le réglage de
ur — ou vitesse de base (réglage
ateur) a été fait de telle sorte que le
ement d'air total dans la maison soit
ventilation naturelle comprise. Le
renouvellement d'air à la vitesse de
ons de type B était de 0,23 - 0,26 N
de la maison, ventilation naturelle
n d'avoir une « vitesse de base » qui
5 N dans les maisons de type B, car
ssible, pendant le jour ou pendant
ongue hors de la maison, de réduire
lonc la consommation d'énergie. Il
tion qui indique quand les maisons
nouvellement d'air d'environ 0,5 N
de type B.

te compte que les occupants, dans

longues et qui n'ont pas de systèmes d'extraction. Les
résultats des mesures donnés au tableau 2 indiquent le
taux de renouvellement d'air dans les maisons de type
A et B avec le ventilateur réglé sur la vitesse de base et
conformément à la recommandation du Règlement de
construction suédois (environ 0,5 N). Les mesures ont
été effectuées avec la bouche d'insufflation ouverte ou
fermée. Elles se rapportent à une chambre principale
d'environ 13 m². Les portes menant aux autres
chambres étaient maintenues fermées.

Le tableau 10 montre clairement que, seules, les
maisons de type A ont un taux de renouvellement
d'air qui correspond à la valeur recommandée de
25 m³/heure. Dans les maisons de type B, avec
ventilateur réglé au minimum, la valeur descendait à
environ 5,0 m³/h avec bouche d'insufflation fermée.
Cette valeur est totalement inacceptable d'un point de
vue hygiénique et provoque une augmentation de
l'HR et de la teneur en CO₂. Les résultats montrent
également que les bouches d'insufflation ont une
influence décisive sur le taux de renouvellement d'air
dans les pièces. Pour cette raison, il ne doit pas être
possible de les fermer complètement.

Tableau 10 Taux de renouvellement d'air pour différents
réglages du ventilateur dans les chambres principales avec
bouches d'insufflation respectivement ouvertes et fermées.
Les portes des chambres étaient fermées (m³/h)

Réglage du ventilateur	Maison A	Maison B1	Maison B2	Valeur recom- mandée
Vitesse de base d'environ 0,25 N dans toute la maison (bouche d'insufflation fermée)	—	4,7	5	25
Vitesse de base d'environ 0,25 N dans toute la maison (bouche d'insufflation ouverte)	—	9,7	12,2	25
Comme prescrit par le Règlement de cons- truction suédois, envi- ron 0,5 N dans toute la maison (bouche d'insufflation fermée)	21,6	9,4	8,4	25

uedois, on obtenait néanmoins des
bles dans les maisons de type B (avec la
flation en forme de fente fermée).
t approximativement la même qu'à la
avec la bouche d'insufflation ouverte.

O₂

ns de type B, des taux de renouvelles
s faibles ont été mesurés dans les
cher. La valeur mesurée la plus faible
si correspond à un taux de renouvelle-
N. Ceci concorde avec la quantité
ntilation naturelle dans la maison.

l'augmentation de la teneur en CO₂,
lessous, illustre l'augmentation de la
dans la maison B2. Cette teneur en
e avec l'équation suivante :

$$q/nv (1 - e^{-nt}) + c_0 e^{-nt}$$

ation en CO₂ au temps t, n = taux de
d'air, t = temps (h), q = teneur en
m³/h, v = volume de la pièce (m³), c₀
générale de CO₂ dans la pièce.

ment comme hypothèse que la pièce
deux adultes et un enfant, que la porte
une personne au repos expire 20 l de

Le chiffre correspondant pour un
est 10 l CO₂/h.

Les figures 4 et 5 montrent la variation de la teneur en CO₂ avec le temps dans les maisons de type A et B2 pour différents taux de renouvellement d'air dans la chambre à coucher principale, porte fermée, occupée par deux adultes et un enfant endormis.

Augmentation de la teneur en eau

Une personne au repos, produit environ 40 g de vapeur d'eau par heure. Si nous prenons comme hypothèse que deux adultes et un enfant dorment dans la chambre principale, l'apport de vapeur sera d'environ 100 g/h (40 + 40 + 20). Il peut exister d'autres sources d'humidité susceptibles d'augmenter encore l'émission de vapeur, mais on peut les considérer comme mineures.

L'augmentation de la teneur en eau dans la pièce dépend de la bonne ventilation ou non de la pièce. Les figures 6-7 montrent comment la teneur en eau

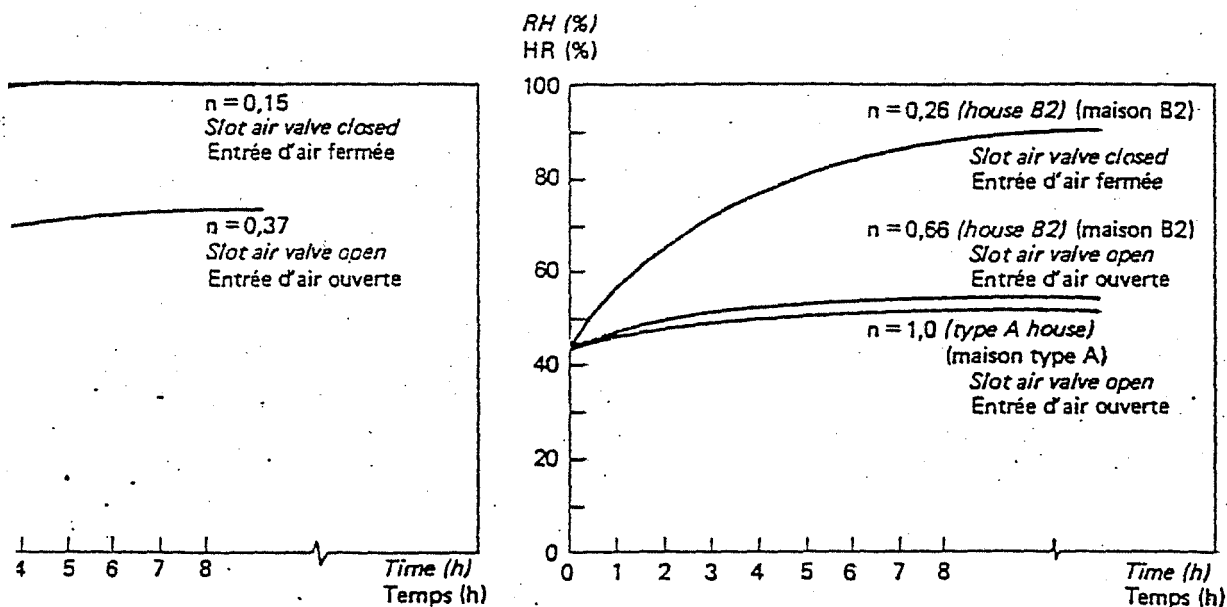


Figure 7

ure content in master bedroom of
slot air valves respectively closed and
approximately 0.25 air changes/h
indoor temperature 19 °C, outdoor
RH 80 per cent

House types A and B compared for increase in
moisture content in master bedroom with slot air valves
open and closed. Fan setting at approximately 0.5 air
changes/h (0.35 l/s m²), indoor temperature 19 °C and
outdoor temperature 0 °C, RH 80 per cent

Le temps pour les maisons A et B2 où l'humidité extérieure est de 0° C, et l'humidité relative de 70 %. Ces calculs ont été effectués en utilisant la méthode que pour le calcul de la teneur en eau ci-dessus.

On indique la limite supérieure pour la teneur en eau dans la chambre à coucher. La présence de meubles absorbants dans la chambre réduit la valeur calculée. Tous les calculs sont basés sur les données au tableau 11. Les valeurs des 6-7 indiquent la teneur en eau dans la chambre à coucher en régime permanent avec un apport d'air dans l'ensemble de toute la maison et un taux de renouvellement d'air de

0,25 N indiquent également que la teneur en eau dans la chambre à coucher des parents de la maison B2 devient inadmissiblement élevée si l'insufflation est fermée. Lorsqu'elle est ouverte, les teneurs deviennent admissibles dans les chambres des maisons de type A et de

type B2. Presque toutes les bouches d'insufflation sur le marché aujourd'hui pour des maisons de type A et B2 peuvent être fermées complètement. Il est probable que beaucoup de gens qui passent l'hiver dans l'espoir d'économiser de l'énergie en réduisant les « courants d'air ». Mais si les bouches d'insufflation sont fermées, le climat intérieur se dégrade. On observe une augmentation de la teneur en eau durant de longues périodes, ce qui provoque l'apparition de moisissures, de dommages dus à la condensation sur les fenêtres ou le développement de moisissures sur les placards posés sur les murs

Tableau 11 Taux de renouvellement d'air pour différents réglages dans la chambre à coucher des parents

Maison	Réglage du ventilateur	Taux de renouvellement d'air mesuré dans une chambre	
		m ³ /h	N
A	Réglage du ventilateur conforme au Règlement de construction suédois (0,35 l/s m ²) environ 0,5 N dans toute la maison, bouche d'insufflation ouverte	29,5	1,0
	Réglage du ventilateur conforme au Règlement de construction suédois (0,35 l/s m ²) environ 0,5 N dans toute la maison, bouche d'insufflation fermée Nota : la bouche dans la maison de type A ne peut être fermée complètement, au contraire de la maison de type B	21,6	0,73
B2	Ventilateur réglé sur vitesse de base, environ 0,25 N dans toute la maison, bouche d'insufflation fermée	5	0,15
	Ventilateur réglé conformément au Règlement de construction suédois (0,35 l/s m ²) environ 0,5 N dans toute la maison, bouche d'insufflation fermée	8,4	0,26
	Ventilateur réglé sur vitesse de base, environ 0,25 N dans toute la maison, bouche d'insufflation ouverte	12,2	0,37
	Ventilateur réglé conformément au Règlement de construction suédois (0,35 l/s m ²) environ 0,5 N dans toute la maison, bouche d'insufflation ouverte	19,6	0,66