

ENVIRONNEMENT INTÉRIEUR, QUALITÉ DE L'AIR ET SANTÉ

Qualité de l'air intérieur dans les bâtiments neufs : données disponibles et spécificités

Corinne MANDIN*, François MAUPETIT*

Le réseau multidisciplinaire RSEIN, Recherche Santé Environnement Intérieur, rassemble depuis 2001 des experts français, chercheurs, métrologues, modélisateurs, épidémiologistes, médecins, évaluateurs de risque, dont les activités sont liées à la qualité de l'air intérieur. En partenariat étroit avec l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur (OQAI), le réseau RSEIN assure une veille scientifique dans le domaine de l'environnement intérieur au sens large excepté le champ de l'hygiène industrielle et celui des rayonnements électromagnétiques. Le bulletin trimestriel *Info Santé Environnement Intérieur*, téléchargeable sur le site Internet du réseau <http://rsein.ineris.fr>, rassemble ces travaux de veille et fournit notamment les analyses de quelques-unes des publications scientifiques internationales considérées comme les plus importantes et/ou intéressantes parmi l'ensemble des articles répertoriés chaque trimestre. Les brèves synthèses du bulletin traitent indifféremment des substances, des micro-environnements et des effets sanitaires. Parallèlement à la publication du bulletin, la présente rubrique, financée par l'ADEME, a pour objectif d'apporter chaque trimestre un éclairage plus particulier sur un thème choisi par le comité de rédaction RSEIN en s'appuyant sur les données de la littérature publiées récemment. Au sein de cette rubrique, le Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB) ou l'un de ses partenaires est chargé d'apporter des compléments sur le sujet traité, de rapporter les actualités de l'OQAI ou d'aborder des thèmes non couverts par la veille RSEIN.

La qualité de l'air intérieur dans les bâtiments neufs représente une problématique à part entière. À l'heure où les démarches volontaires de labellisation ou de qualification de bâtiments au regard de leur « qualité sanitaire », souvent en association avec leur performance énergétique, se multiplient, la question de la qualité de l'air intérieur à réception se pose. Faut-il accompagner la démarche constructive pour viser des critères de performance intégrant la qualité de l'air intérieur ? Quels indicateurs sont alors à concevoir pour vérifier l'atteinte des exigences visées ? Les valeurs guides de qualité de l'air intérieur établies par l'ANSES (Agence française de sécurité sanitaire en charge de l'alimentation, de l'environnement et du travail), le HCSP (Haut Conseil de la santé publique) ou l'OMS (Organisation mondiale de la santé) peuvent-elles être utilisées dans ce contexte ? Un préalable à de premiers éléments de réponse est la compilation des connaissances disponibles sur les substances en présence dans les bâtiments neufs et les ordres de grandeur de leurs concentrations intérieures. Cet article a ainsi pour objectif de présenter les données disponibles à ce jour dans la littérature scientifique sur les spécificités de l'air intérieur dans les bâtiments neufs, tant qualitativement que quantitativement.

Méthode et champs couverts

On entend par « bâtiment neuf », dans cet article, tout bâtiment dont la construction s'est achevée il y a quelques semaines, voire au maximum quelques mois, et qui n'a, si possible, pas encore été occupé afin de s'affranchir de l'influence des occupants. Dans ce contexte, cette revue bibliographique ne s'intéresse pas au cas particulier des bâtiments réhabilités ou rénovés. Les auteurs de certaines publications avaient toutefois une acception plus large de l'expression « bâtiments neufs », qualifiant ainsi des logements (occupés) datant de quelques années. Des précisions sur les dates de construction sont apportées au cas par cas.

Une recherche bibliographique avec les mots-clés "new built", "newly (ou recently) built" et "newly (ou recently) constructed" a été réalisée dans les bases de données bibliographiques *Current Contents* et *PubMed*. Les actes des conférences internationales dans le champ de la qualité de l'air intérieur, *Indoor Air* et *Healthy Buildings*, ont également été consultés (éditions les plus récentes). Afin d'être le plus représentatif de la situation actuelle, seules les études postérieures à 2000 ont été examinées. Aucune

* Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB), corinne.mandin@cstb.fr et francois.maupetit@cstb.fr

restriction géographique n'a en revanche été imposée, même s'il est évident que compte tenu des différences de typologies constructives, de climat et de comportements des occupants, la qualité de l'air intérieur dans les bâtiments des autres pays n'est pas nécessairement à l'image de la situation française.

Cette revue bibliographique s'intéresse aux principaux lieux de vie bâtis (eu égard au temps passé par la population), à savoir les logements, les lieux d'enseignement et d'accueil de la petite enfance et les bureaux. Elle ne rapporte pas les données disponibles (peu nombreuses) pour d'autres environnements clos, comme les véhicules, les hôtels ou les hôpitaux. Par ailleurs, la présente revue bibliographique ne rapporte que les données de mesure de concentrations *in situ* ; les résultats de tests d'émission de matériaux neufs ne sont pas traités. Enfin, elle ne vise pas non plus à fournir l'inventaire des démarches, lignes directrices ou guides méthodologiques existants pour la construction de bâtiments intégrant des exigences visant à atteindre une « bonne » qualité de l'air intérieur.

Qualité de l'air intérieur dans les logements neufs

Globalement, eu égard au nombre de publications parues ces dernières années sur l'air intérieur, peu de travaux documentent spécifiquement le cas des logements neufs. La plupart n'ont pas été réalisés en Europe, mais en Australie et en Asie (Japon, Corée du Sud et Chine). Le formaldéhyde est le composé le plus souvent étudié. Aucune publication n'aborde le cas de la contamination biologique.

En France, il n'existe quasiment pas de données décrivant spécifiquement la qualité de l'air intérieur dans des bâtiments neufs. Les résultats de la campagne nationale dans les logements menée entre 2003 et 2005 par l'Observatoire de la qualité de l'air intérieur (OQAI) ont été examinés [1]. Cependant, un seul logement était neuf (moins de 1 an) lors des enquêtes. À noter que l'OQAI collecte actuellement des données à réception de maisons individuelles performantes en énergie qui seront disponibles courant 2011.

Par ailleurs, l'Association agréée pour la surveillance de la qualité de l'air en région Pays de La Loire a réalisé fin 2009-début 2010 des mesures de concentrations intérieures en aldéhydes, benzène, toluène, éthylbenzène et xylènes dans une maison « éco-performante » à trois périodes : un mois après l'achèvement du chantier, à l'entrée des occupants (une famille de cinq personnes) et un mois et demi après le début de l'occupation [2]. Les prélèvements ont été réalisés au moyen de tubes passifs exposés sept jours, dans le salon et la chambre. Peintures sans solvant, isolants naturels et bois non traités ont été choisis pour équiper cette maison peu consommatrice en énergie. Les résultats sont rapportés dans le tableau 1. Les concentrations intérieures à réception sont très voisines des concentrations médianes de la campagne nationale « Logements » de l'OQAI. Elles évoluent assez peu après l'emménagement, sauf pour certains polluants (tendance à l'augmentation pour l'acétaldéhyde, le propanal, le benzène et les xylènes), en lien vraisemblablement avec l'ameublement du logement et les activités des occupants (tabagisme dans le garage, utilisation d'encens, d'huiles essentielles et d'un aérosol dépoussiérant pour meuble).

Tableau 1.
Concentrations intérieures (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$) mesurées dans une maison neuve à réception (non meublée), puis après l'entrée des occupants.
Les Herbiers, Vendée, 2009-2010 [2].

	Avant occupation (octobre 2009)*		Quelques jours après l'emménagement (décembre 2009)		Un mois et demi après l'emménagement (janvier 2010)	
	Salon	Chambre	Salon	Chambre	Salon	Chambre
Formaldéhyde	18	18	19	15	24	18
Acétaldéhyde	11	12	27	20	36	25
Propanal	2,4	2,7	4,5	3,2	5,9	3,8
Butanal	19,0	20	20	15	17	13
Benzaldéhyde	0,4	0,4	0,6	0,5	0,7	0,5
Isopentanal	0,5	0,5	1,1	0,8	1,7	1,1
Pentanal	8,1	8,1	5,7	3,9	4,9	3,9
Hexanal	40	40	29	20	30	24
Benzène	0,5	0,5	3,5	moyenne des deux pièces	5,2	3,6
Toluène	12	13	11		13	9,1
Ethylbenzène	0,4	0,4	1,3		1,7	1,2
Xylènes	1,8	1,7	5,1		6,3	4,4

* La ventilation mécanique contrôlée double-flux était en fonctionnement, au débit minimal de 50 m^3/h par souci d'économie d'énergie.

Nota : Température intérieure, humidité relative et concentration en CO_2 ont également été mesurées (résultats non rapportés).

Dans les autres pays, les données les plus nombreuses proviennent d'études réalisées au Japon et en Corée du Sud ; peu de travaux ont été conduits en Europe.

Au Danemark, Gunnarsen *et al.* ont mesuré, entre février et juin 2007, les concentrations en formaldéhyde dans 20 maisons récentes [3]. Toutes ces maisons dataient de six ans au maximum et étaient occupées. Les prélèvements (actifs, d'une durée de 30 minutes) étaient réalisés dans la plus petite pièce de vie du logement, portes et fenêtres fermées, les autres habitudes du foyer restant inchangées. La date de construction est apparue comme déterminante des concentrations en formaldéhyde, plus élevées dans les logements les plus récents (dépassant 100 µg/m³ dans deux logements ; concentration moyenne égale à 50 µg/m³). Il n'a pas été observé d'association entre ces concentrations et le taux de renouvellement d'air (en moyenne égal à 0,44 h⁻¹), le tabagisme, la taille des pièces, la température intérieure et le poids d'eau dans le logement (humidité absolue, en g/m³).

En Finlande, plusieurs études ont été réalisées dans le contexte de la mise en place du système national d'étiquetage volontaire des émissions des matériaux de construction (label M1) et de classification des bâtiments au regard de valeurs guides de qualité d'air intérieur. Tuomainen *et al.* ont ainsi suivi les concentrations intérieures dans deux immeubles résidentiels, l'un construit de façon standard (témoin) et l'autre suivant les prescriptions de la classification en place [4]. Les prélèvements, actifs d'une durée de deux à six heures, ont été effectués dans le séjour et la chambre d'un appartement par étage (chaque immeuble comptant six étages), avant puis cinq mois après l'emménagement des occupants. On constate dans le tableau 2, d'une part, que pour tous les polluants excepté le formaldéhyde, les concentrations diminuent dans le temps, notamment après une aération poussée du bâtiment avant l'arrivée des occupants, et, d'autre part, que les concentrations sont

plus faibles dans l'immeuble construit selon le référentiel finlandais exigeant notamment l'utilisation de matériaux de construction moins émissifs.

Ces mêmes auteurs ont ensuite réalisé un suivi des concentrations dans ces deux immeubles, 1 an, 2 ans et 3 ans après le début de l'occupation, en y associant un auto-questionnaire documentant la satisfaction des occupants vis-à-vis de leur environnement intérieur [5]. Les concentrations y restaient plus faibles dans l'immeuble « labellisé » et les occupants ont rapporté une diminution des symptômes asthmatiques.

Enfin, afin de compléter les données sur la qualité de l'air dans ce type de logements construits selon le référentiel finlandais, Järnström *et al.* ont instrumenté, entre 1999 et 2003, 14 logements neufs inoccupés (construits 12 mois à 1 an ½ avant le début du suivi) ayant mis en œuvre des matériaux faiblement émissifs [6]. Les moyennes des concentrations intérieures en composés organiques volatils (COV) totaux et en formaldéhyde étaient respectivement de 780 et 19 µg/m³ au début du suivi, de 330 et 21 µg/m³ après six mois et de 247 et 26 µg/m³ après 12 mois. Dans les années suivant la construction de ces logements, on constate donc une baisse marquée de l'ensemble des COV et des valeurs de formaldéhyde constantes, voire en légère hausse.

Aux États-Unis, des premières études sur le sujet ont été conduites à la fin des années 1990 [7-8]. Compte tenu de leur ancienneté, elles ne sont pas décrites plus en détail. Une seule étude plus récente a été recensée ; elle a été réalisée en Californie en 2005-2006 dans 108 maisons neuves, construites depuis moins de trois ans et occupées depuis au moins un an [9]. Elle montre que le type de ventilation a relativement peu d'effet sur les concentrations intérieures en formaldéhyde. Ainsi, les concentrations médianes mesurées en formaldéhyde étaient de 35 µg/m³ dans les maisons sans ventilation mécanique, de 66 µg/m³ dans les maisons avec ventilation mécanique et de 35 µg/m³ dans les maisons avec

Tableau 2.
Médianes des concentrations intérieures (en µg/m³) mesurées dans deux immeubles résidentiels neufs.
Finlande, 1997-1998 [4].

Substance	Immeuble construit selon le référentiel finlandais			Immeuble témoin	
	Avant occupation et ventilation poussée	Avant occupation et après ventilation poussée	5 mois après occupation	Avant occupation	5 mois après occupation
Formaldéhyde	8	10	13	17	15
Acétaldéhyde	7	6	11	18	3
Ammoniac	21	24	15	44	28
Toluène	NR	19	12	361	84
Xylènes	93	46	NR	70	17
Limonène	NR	140	23	NR	19
a-pinène	89	46	NR	78	51
COV totaux	911	408	153	4 082	733

NR : concentration non renseignée.

ventilation mécanique et récupération de chaleur. Toutefois, en examinant spécifiquement les six maisons où les occupants ont déclaré ne jamais ouvrir les portes et les fenêtres extérieures, la concentration intérieure en formaldéhyde était égale à 84,6 µg/m³ en moyenne dans les maisons sans ventilation mécanique (n = 5 ; taux de renouvellement d'air moyen de 0,22 h⁻¹) et 12 µg/m³ dans la maison avec ventilation mécanique (1,28 h⁻¹).

En Australie, Brown a comparé les concentrations intérieures en aldéhydes et en COV dans une maison nouvellement construite, en situation d'occupation à différentes durées après achèvement, en comparaison des concentrations dans un groupe de 22 maisons occupées, n'ayant pas fait l'objet de travaux dans les douze mois précédents et dans lesquelles aucune plainte n'était rapportée [10]. Les 22 maisons occupées étaient situées dans des quartiers résidentiels de Melbourne. Les prélèvements (actifs, d'une durée de 30 à 60 minutes) ont été réalisés pendant l'été et le début de l'automne, dans le séjour, dans une chambre et à l'extérieur de chaque maison. Il était demandé aux occupants de maintenir fermés les ouvrants extérieurs et de ne pas utiliser de produits de nettoyage, respectivement pendant les 2 heures et les 24 heures précédant les prélèvements. Aucune consigne relative au tabagisme n'avait été émise ; ce dernier était courant dans quatre maisons et a eu lieu pendant la mesure dans un seul cas. D'une surface de 190 m² sur deux niveaux, la maison neuve était équipée d'une ventilation méca-

nique contrôlée en fonctionnement permanent (taux de renouvellement d'air égal à 0,35 h⁻¹) et de matériaux peu émissifs. Quelques résultats sont présentés dans le tableau 3. Ils montrent que les concentrations intérieures décroissent avec le temps dans la maison neuve inoccupée. Pour les aldéhydes et les terpènes, les concentrations à huit mois restent supérieures à celles mesurées dans les maisons plus anciennes et occupées, mais ceci est à relativiser du fait de l'absence d'utilisation de produits d'entretien (émetteurs de ces mêmes substances) pendant la journée avant les prélèvements dans les maisons occupées.

Toujours en Australie mais plus récemment, une maison neuve ayant mis en œuvre des matériaux, des revêtements et du mobilier les moins émissifs possibles en COV (émissions quantifiées au préalable dans le cadre de l'étude) a été instrumentée [11]. Des prélèvements actifs, d'une durée de 30 minutes, ont été réalisés dans le salon, la salle à manger et la salle de bains à 3 mois (à l'arrivée des occupants), puis 5 mois et 1 an après l'achèvement des travaux. Il était conseillé aux occupants d'éviter l'utilisation de tout produit de consommation susceptible d'émettre des COV. Les concentrations intérieures moyennes en COV totaux mesurées aux trois périodes étaient respectivement égales à 43, 28 et moins de 5 µg/m³, avec un taux de renouvellement d'air variant de 0,36 à 1,6 h⁻¹ (pas de ventilation mécanique contrôlée, uniquement ouverture des portes et fenêtres positionnées – à la conception – de façon à optimiser l'aération des pièces).

Tableau 3.
Concentrations intérieures (en µg/m³) mesurées dans une maison neuve inoccupée équipée de matériaux peu émissifs et dans 22 maisons occupées.
Melbourne, Australie, avant 2000 [10].

	Maisons occupées (n = 22)		Maison neuve inoccupée							
			Séjour				Chambre			
	AM	GM	J = 2	J = 19	J = 72*	J = 246	J = 2	J = 19	J = 72*	J = 246
Formaldéhyde	nq	nq	120	87	60	46	120	93	56	64
Hexanal	5	3,2	38	62	11	9,3	33	63	14	16
Acétone	13	5,6	120	110	170	29	130	100	46	64
Benzène	7,0	3,3	< 30	< 12	< 13	2,2	< 35	< 12	< 13	3,0
Toluène	14	8,9	250	100	18	6,9	84	110	12	12
Ethylbenzène	1,8	1,5	8,0	14	28	0,9	12	13	1,5	0,9
m/p-xylènes	6,9	4,1	30	29	25	2,8	< 30	27	3,9	2,4
Styrène	0,9	0,9	nq	nq	nq	nq	nq	nq	nq	nq
α-pinène	3,5	2,4	52	30	13	9,3	50	34	10	19
Limonène	11	4,8	12	15	34	7,9	4,8	15	39	15
p-dichlorobenzène	31	3,4	nq	nq	nq	nq	nq	nq	nq	nq
Naphtalène	3,2	1,6	nq	nq	nq	nq	nq	nq	nq	nq
Méthanol	nq	nq	550	770	200	130	860	790	170	220
1,2-propanediol	nq	nq	330	< 15	< 2	< 0,5	1 600	< 5	< 2	< 0,5
Texanol®	nq	nq	220	120	30	5,9	560	150	43	25
COV totaux	320	160	3 000	1 200	570	220	5 000	1 400	420	350

Légende : AM : moyenne arithmétique – GM : moyenne géométrique – J : nombre de jours écoulés depuis l'achèvement –
* : moyenne de deux échantillons sauf pour le formaldéhyde – nq : non quantifié (non recherché ou problème analytique).

Le Japon a mis en place très tôt, dès le début des années 1990, des mesures de gestion de la qualité de l'air intérieur, passant par la réduction des émissions des matériaux et produits, voire l'interdiction de certaines substances chimiques, et l'établissement de valeurs guides de qualité de l'air intérieur [12]. Afin de vérifier l'efficacité de ces politiques publiques, de larges campagnes de mesure de la qualité de l'air intérieur ont été réalisées, couvrant au total entre 2000 et 2005 plus de 10 000 logements neufs (construits depuis moins de 1 an) [13]. Des tubes passifs étaient envoyés aux occupants, qui les retournaient par courrier postal après 24 heures d'exposition dans leur logement. Les résultats montrent une diminution régulière des concentrations en formaldéhyde, toluène, xylènes et éthylbenzène en fonction des années, quelles que soient les typologies de bâtiments et les régions. Les dépassements des valeurs guides établies ont également fortement diminué. Par contre, les concentrations moyennes en acétaldéhyde et en styrène évoluent peu. L'installation d'une ventilation mécanique permanente a été rendue obligatoire en 2003. Cependant, il ne semble pas que cette mesure représente la principale contribution à la diminution des concentrations, tout au moins pour le formaldéhyde et le toluène. En effet, la comparaison des évolutions de leurs concentrations en fonction des années dans des logements équipés d'une ventilation continue *versus* dans des logements sans ventilation permanente ne montre pas de différence, laissant penser que c'est plutôt la réduction à la source des émissions qui joue un rôle notable sur les concentrations intérieures.

Par ailleurs, un suivi longitudinal de maisons ($n = 1\,029$) et d'appartements ($n = 329$) répartis dans tout le Japon, neufs (1/4) et anciens (3/4), a été réalisé par Park et Ikeda de 2000 à 2002 [14]. Plus d'une vingtaine de COV et d'aldéhydes ont été mesurés par tubes passifs exposés 24 heures. Il apparaît que les concentrations dans les logements neufs sont supérieures à celles des logements anciens. Dans les logements neufs, toutes les concentrations diminuent la première année, significativement pour la plupart des COV ($p < 0,05$). Le formaldéhyde et l' α -pinène, principalement émis par les produits à base de bois, présentent une décroissance plus lente (concentrations respectivement égales à 134 et 269 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à réception et à 86 et 38 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ à l'issue de la troisième année du suivi).

Enfin, on peut préciser que c'est au Japon que la thématique de la qualité de l'air intérieur dans les bâtiments neufs a aussi été abordée sous l'angle des effets sanitaires rapportés par leurs occupants, et plus particulièrement dans le contexte général du syndrome des bâtiments malsains [15-18].

En Corée du Sud, une campagne à large échelle a été conduite dans 868 nouveaux appartements en 2004 et 2005, afin de documenter les déterminants des concentrations intérieures dans ce type de bâtiment [19]. Les concentrations moyennes en formaldéhyde et en toluène étaient relativement élevées

(292 et 1 016 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivement). Des campagnes de mesure dans des échantillons plus limités de logements neufs ont également été réalisées ultérieurement, confirmant le dépassement fréquent des valeurs guides de qualité d'air intérieur coréennes pour le formaldéhyde et le toluène [20]. Dans six appartements neufs situés dans des tours d'habitation, Kim *et al.* ont testé différents moyens visant à réduire les concentrations en COV et en aldéhydes entre la réception du bâtiment et l'entrée des premiers occupants [21]. Une aération intensive par ouverture permanente des fenêtres diminue les concentrations intérieures, mais cette technique présente des contraintes opérationnelles évidentes.

Enfin, une étude très récemment publiée avait pour objectif l'évaluation de l'efficacité de la réglementation coréenne relative à la qualité de l'air intérieur dans les immeubles résidentiels neufs comptant plus de 100 appartements, publiée en 2003 et effective à compter de mai 2004 [22]. Cette réglementation exige de tout promoteur immobilier la vérification du respect des valeurs guides pour six COV avant l'entrée des occupants dans tout nouveau logement. Les valeurs guides en question ont été publiées le 1^{er} janvier 2006 et sont les suivantes : 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour le benzène, 1 000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour le toluène, 360 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour l'éthylbenzène, 700 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour les xylènes, 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour le styrène et 210 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pour le formaldéhyde (les pas de temps associés ne sont pas précisés). À noter que cette même loi (2003) impose la quantification des émissions en formaldéhyde et en COV totaux des matériaux de construction et de décoration mis en œuvre dans les appartements. Afin d'évaluer l'impact de cette loi, des mesures ont été réalisées dans 228 appartements neufs inoccupés de 15 villes sud-coréennes, en 2005 (108 appartements), puis en 2006-2007 (120 autres appartements), répartis à chaque fois à parts égales en trois catégories de taille (moins de 90 m^2 ; entre 91 et 110 m^2 ; plus de 111 m^2). Les prélèvements d'air ont été réalisés conformément à une norme du ministère de l'Environnement. Il s'agissait de prélèvements actifs d'une durée de 30 ou 60 minutes sur tube TENAX pour les COV et cartouche DNPH précédée d'un filtre à ozone pour les aldéhydes. Ils étaient réalisés au milieu du séjour entre 1,2 et 1,5 m de hauteur et à distance des parois (au moins 1 m). Les mesures avaient lieu en période hivernale et la température dans l'appartement devait être maintenue à plus de 20 °C. Préalablement à chaque prélèvement, les fenêtres étaient ouvertes pendant 30 minutes, puis fermées pendant au moins 1 heure. Les portes intérieures étaient maintenues ouvertes. Enfin, un point extérieur servait de référence par groupe d'appartements d'un même immeuble. Les résultats pour les polluants détectés dans 100 % des appartements en 2005 sont présentés dans le tableau 4. Ils attestent des fortes concentrations mesurées dans les logements neufs et montrent que la réglementation mise en place a une efficacité réelle, dans des proportions variables selon les substances. À titre d'exemple, la concentration moyenne en COV totaux est passée de 1 606 à 645 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dans les

logements neufs suite à la mise en place de cette réglementation. Cette diminution semble principalement liée à la diminution des COV émis par les revêtements de sol, les adhésifs et les peintures. Tandis que les valeurs guides étaient parfois dépassées pour certains composés en 2005, plus aucun dépassement n'est observé en 2006 et 2007. À noter que la réglementation n'a pas eu d'effet sur les concentrations intérieures en styrène.

Des composés moins communément mesurés dans l'air intérieur à ce jour ont été recherchés dans des bâtiments neufs par quelques équipes. Ainsi, aux États-Unis (Californie), Seaman *et al.* ont mesuré en 2006 les concentrations intérieures en **acroléine** dans six maisons neuves inoccupées (quatre meublées et deux non meublées ; prélèvements toutes les deux heures pendant 24 heures, à deux reprises à un mois d'intervalle) [23]. Les maisons neuves non meublées avaient des concentrations de l'ordre de 3 µg/m³, voisines de celles des maisons occupées, tandis que dans les maisons neuves meublées, les niveaux intérieurs en acroléine étaient de l'ordre de 5 µg/m³. Les concentrations dans les maisons inoccupées sont considérées élevées sachant qu'aucune activité de cuisson, source principale d'acroléine, n'a lieu ; elles seraient liées aux émissions du bois utilisé pour la construction, dont la quantification des émissions en acroléine réalisée dans le cadre de l'étude, a en effet montré des taux d'émission allant de 1 à 8 ng/g de bois (pin, peuplier jaune, chêne rouge et séquoia). De plus, dans les maisons inoccupées meublées, les auteurs attribuent les concentrations 1,5 fois plus élevées aux émissions du mobilier neuf et/ou à la

réactivité chimique plus importante dans ce contexte. Au Japon, Saito *et al.* (2004) se sont intéressés aux retardateurs de flamme **organophosphorés** et aux **alkylphénols** dans une maison neuve de Tokyo, inoccupée et non meublée, instrumentée en 2001 [24-25]. Ces substances chimiques sont notamment présentes dans les revêtements (sols, murs et plafonds), en particulier en PVC s'agissant des alkylphénols. Les concentrations mesurées ont été comparées à celles obtenues à la même période dans d'autres maisons tokyoïtes en situation d'occupation. Pour quatre organophosphorés, les concentrations maximales étaient celles mesurées dans la maison neuve (gamme des concentrations dans les autres maisons, n = 18) : triéthylphosphate 214 ng/m³ (< LD – 58,2 ng/m³) ; tributylphosphate 36,6 ng/m³ (< LD – 30,6 ng/m³) ; tris(butoxyéthyl)phosphate 71,0 ng/m³ (< LD – 13,7 ng/m³) ; tris(1,3-dichloro-2-propyl)phosphate 1,3 ng/m³ (< LD – 0,60 ng/m³). Pour deux composés (triméthylphosphate et tris(2-chloro-1-méthyléthyl) phosphate), les concentrations mesurées dans la maison neuve (respectivement 2,1 et 5,5 ng/m³) étaient supérieures aux médianes des concentrations observées dans les autres maisons (resp. < LD et 1,9 ng/m³), mais dans la gamme des concentrations observées (resp. < LD – 2,3 ng/m³ et < LD – 1 260 ng/m³). Pour un unique composé (tris(2-chloroéthyl)phosphate), la concentration mesurée dans la maison neuve (1,2 ng/m³) était inférieure à la médiane témoin (1,3 ng/m³ ; min < LD et max égal à 136 ng/m³). Concernant les alkylphénols, les concentrations en 4-t-butylphénol et 4-nonylphénol étaient 11 fois supérieures aux médianes respectives des

Tableau 4.
Concentrations intérieures (en µg/m³) mesurées dans des appartements coréens neufs avant (2005), puis après mise en place d'une réglementation relative à la qualité de l'air intérieur. (2006-2007) [22].

Substance	Année	Nombre d'appartements	Fréquence de détection	Moyenne géométrique (σ)	Percentile 90	Maximum
Toluène	2005	108	100 %	306 (227)	611	1 591
	2006 ou 2007	120	100 %	132 (109)	328	470
Ethylbenzène	2005	108	100 %	46 (118)	246	629
	2006 ou 2007	120	100 %	8,4 (8,2)	20	46
Xylènes	2005	108	100 %	127 (329)	897	1 402
	2006 ou 2007	120	100 %	26 (24)	61	153
Formaldéhyde	2005	108	100 %	66 (45)	141	276
	2006 ou 2007	120	100 %	40 (32)	101	142
Acétaldéhyde	2005	108	100 %	12 (6,9)	23	40
	2006 ou 2007	120	98 %	7,2 (5,5)	17	24
Acétone	2005	108	100 %	69 (74)	153	525
	2006 ou 2007	120	99 %	50 (81)	183	455
Benzaldéhyde	2005	108	100 %	5,7 (6,3)	18	30
	2006 ou 2007	120	99 %	4,8 (7,4)	17	43
COV totaux	2005	108	sans objet	1 606*	3 222	5 635
	2006 ou 2007	120	sans objet	645*	1 294	1 623

* Moyenne arithmétique.

concentrations dans l'air des maisons témoins ($n = 45$), ce qui n'était pas le cas du 4-t-octylphénol mesuré en concentration équivalente.

L'âge du logement, déterminant de la qualité de l'air intérieur ?

Certains autres travaux ne se sont pas intéressés spécifiquement à la qualité de l'air intérieur dans les bâtiments neufs, mais ont pu mettre en évidence les spécificités de ces bâtiments lors d'une analyse des déterminants de la pollution intérieure. C'est le cas, par exemple, de la campagne nationale menée dans les logements anglais ($n = 876$) par le *Building Research Establishment* (BRE) entre octobre 1997 et février 1999 [26]. Une fois retirés de l'échantillon les logements dans lesquels des travaux de peinture ont été effectués récemment, les concentrations en COV totaux et en formaldéhyde (mesurées par tubes passifs exposés respectivement 4 et 3 jours dans la chambre) apparaissent corrélées à l'âge du bâtiment. Ainsi, les concentrations en COV totaux dans les maisons construites avant 1919 ($147 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne) étaient significativement inférieures à celles dans les maisons construites après 1990 ($269 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en moyenne). La même observation a été faite pour les concentrations en formaldéhyde (environ 16 versus $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Des conclusions similaires montrant des concentrations en formaldéhyde significativement plus élevées dans des logements récents ont été obtenues dans plusieurs autres études. De l'exploitation des données de la campagne nationale « Logements » de l'OQAI, il ressort que les concentrations en formaldéhyde dans les logements construits après 1975 sont significativement plus élevées que celles mesurées dans les logements datant d'avant 1948 (OR = 2,60 ; IC₉₅ % 1,61 – 4,20) [27]. Une telle relation n'est pas retrouvée pour les autres COV et aldéhydes. Au Canada, dans un échantillon de 59 maisons de l'île du Prince Edouard instrumentées entre janvier et avril 2002 (prélèvement actif de 24 heures), Gilbert *et al.* ont montré que les concentrations en formaldéhyde étaient significativement plus élevées dans les maisons construites après 1970 ($p < 0,01$). Les concentrations en acétaldéhyde et en acroléine étaient significativement plus élevées dans les maisons construites entre 1970 et 1985 ($p < 0,005$ et $p < 0,05$ respectivement) [28]. Enfin, à Hong-Kong, les concentrations en COV et en aldéhydes ont été mesurées dans le séjour de 100 logements en novembre 2002 (tubes passifs exposés 24 heures), tandis que les occupants remplissaient un questionnaire visant à caractériser ensuite les déterminants des niveaux intérieurs observés [29]. De cette analyse, il est ressorti que la concentration moyenne en formaldéhyde était significativement plus élevée dans les logements datant de 2002 par rapport à ceux construits en 2001 ($235 \pm 70 \mu\text{g}/\text{m}^3$ versus $134 \pm 60 \mu\text{g}/\text{m}^3$; $p < 0,05$). Une différence, non signifi-

cative cependant, était aussi observée entre 2001 et 2000 ($134 \pm 60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ versus $92 \pm 23 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Cette influence de la date de construction n'a pas été observée pour les autres composés étudiés.

Certaines études n'ont en revanche pas mis en avant le caractère récent du logement comme déterminant des concentrations intérieures car, compte tenu du renouvellement relativement lent du parc, peu de bâtiments sont très récents dans les échantillons tirés au sort aléatoirement (sans sur-échantillonnage des bâtiments neufs), obligeant ainsi à proposer des classes larges d'âge des bâtiments pour les analyses statistiques, ce qui minimise *de facto* le caractère neuf. C'est le cas par exemple de l'échantillon de maisons instrumentées dans le cadre de l'étude américaine RIOPA (*Relations of Indoor, Outdoor, and Personal Air*), où dans le groupe des 179 maisons retenues pour l'analyse des déterminants des concentrations intérieures en formaldéhyde réalisée par Hun *et al.* (2010), 23 maisons dataient de moins de 5 ans [30]. Cette étude montre que les concentrations intérieures en formaldéhyde ne sont pas liées à l'âge du bâtiment (moins de 5 ans, de 5 à 40 ans ou plus de 40 ans), y compris après ajustement sur le taux de renouvellement d'air (classé en deux catégories : $\leq 0,75 \text{ h}^{-1}$ et $> 0,75 \text{ h}^{-1}$). Elle suggère que le contrôle des sources intérieures, notamment des produits de construction avec des liants urée-formol, reste le meilleur moyen de limiter les expositions chroniques au formaldéhyde. Au Japon, Takigawa *et al.* n'ont pas non plus vu de différence significative des concentrations intérieures en COV et en aldéhydes selon l'âge du logement, sauf pour l' α -pinène ($p < 0,001$), dans un échantillon de 425 maisons de moins de 7 ans (prélèvements passifs d'une durée de 24 heures, réalisés dans le séjour un jour de semaine) [18].

Autres lieux de vie

De rares données sont disponibles s'agissant des autres environnements clos.

Dans les **écoles**, une seule étude, réalisée en Corée, a été recensée [31]. Elle ne concerne pas exclusivement des bâtiments neufs, mais visait à identifier les déterminants des concentrations intérieures en monoxyde de carbone (CO), dioxyde de carbone (CO₂), particules (PM₁₀), flore microbienne, COV totaux et formaldéhyde dans les écoles. Ainsi, trois pièces (une classe, un laboratoire et une salle informatique) ont été instrumentées dans un groupe de 55 écoles, à trois saisons (été, automne et hiver) de juillet à décembre 2004. 21 de ces écoles ont été construites dans les 12 mois précédant l'étude. Les concentrations moyennes en COV totaux et en formaldéhyde dans ces dernières (toutes saisons et toutes pièces confondues) apparaissent significativement plus élevées ($p < 0,05$ et $0,03$ respectivement) que celles mesurées dans les écoles datant de 1 à 3 ans ($n = 13$), de 3 à 5 ans ($n = 9$) et de plus de 10 ans ($n = 12$). Les concentrations intérieures en CO

sont de la même façon significativement plus élevées ($p < 0,01$), ce qui est plus surprenant. Les concentrations en PM_{10} ne présentent aucune différence selon la date de construction (moyennes voisines de $84 \mu g/m^3$ pour toutes les périodes), tout comme la charge microbienne (moyenne de l'ordre de $103 CFU/m^3$).

Dans les **immeubles de bureaux**, une seule étude, menée aux États-Unis, a été recensée [32]. Batterman *et al.* ont suivi les concentrations en retardateurs de flamme polybromés dans l'air (phases gazeuse et particulaire) et les poussières déposées au sol dans 10 immeubles de bureaux, dont un neuf (un bâtiment de sept étages, ventilé mécaniquement). Dans ce dernier, les prélèvements ont eu lieu avant l'arrivée des occupants en août 2006 (le bâtiment était alors entièrement équipé), puis ensuite tous les 2-3 mois jusqu'en novembre 2007. Pour l'air comme pour les poussières, les concentrations avant occupation étaient plus faibles que les valeurs médianes dans le reste de l'échantillon. Cependant, elles ont fortement augmenté après le début des activités (doublement des concentrations en un mois environ) pour se stabiliser au bout de 6 à 8 mois dans les poussières et 5 mois dans l'air. Pour ces composés utilisés dans les équipements informatiques et les textiles, les activités des occupants semblent avoir un rôle direct sur les concentrations dans les milieux.

On peut aussi mentionner une étude maintenant ancienne [33] qui aborde une technique envisagée pour réduire les concentrations en COV dans les bâtiments, en l'occurrence un immeuble de bureaux. Cette technique consiste à chauffer intensément le bâtiment préalablement à l'arrivée des occupants pour favoriser le relargage des composés volatils et ainsi faire en sorte que les émissions en occupation normale ensuite soient fortement réduites. Une publication récente a également exploré cette technique par le biais du chauffage par le sol d'un logement [34]. Compte tenu de la quantité de matériaux et du volume du mobilier introduits dans un bâtiment neuf, un chauffage intense sur plusieurs jours est nécessaire pour que le mobilier atteigne la température requise pour augmenter les émissions de COV, qui au final ne sont que faiblement réduites. L'efficacité de cette technique reste ainsi controversée. Elle semble d'autant plus réhabilitaire à l'heure des économies d'énergie dans le bâtiment.

En conclusion

La majorité des études sur la qualité de l'air dans les bâtiments neufs concerne le logement et le formaldéhyde ; peu de données sont disponibles pour d'autres composés chimiques et une unique publication aborde le cas de la contamination biologique. De rares études documentent la qualité de l'air intérieur dans les écoles et les bureaux neufs. Des travaux japonais rapportent des effets sanitaires, s'apparentant aux symptômes de type « syndrome des bâtiments malsains », dans certains logements neufs.

Malgré l'hétérogénéité des situations décrites dans la littérature (bâtiments construits plus ou moins récemment, meublés ou non, ventilés ou non, occupés ou non, rénovés ou non), cette revue bibliographique permet de dégager les tendances suivantes :

- les bâtiments neufs présentent généralement à réception des concentrations en polluants parfois élevées qui ont tendance à décroître plus ou moins rapidement dans le temps. Cette décroissance peut être rapide pour certains composés, ou plus lente pour d'autres comme les aldéhydes (dont le formaldéhyde) ou les terpènes ;
- pour certains polluants, en particulier le formaldéhyde, les bâtiments anciens présentent des concentrations inférieures à celles des bâtiments récents ou neufs ;
- l'arrivée des occupants dans le logement peut modifier les niveaux de pollution du fait de l'ajout de mobilier, des activités domestiques... mais, bien que les études permettent difficilement de quantifier cet effet, l'influence de l'occupation semble être de moindre importance que celle de la charge initiale en polluants du bâti ;
- les expériences menées dans certains pays (notamment Finlande, Japon et Corée du Sud) montrent que les actions volontaires (labels) ou réglementaires combinant une approche de maîtrise des sources (choix de produits à faibles émissions) et de contrôle de la qualité de l'air intérieur (respect d'une valeur guide) se traduisent par une amélioration sensible de la qualité de l'air intérieur dans le parc de bâtiments ;
- plusieurs études montrent que l'abattement des concentrations ne devient significatif qu'avec des taux de renouvellement d'air très élevés, ce qui traduit la prédominance de l'impact des sources émissives par rapport à celui de la ventilation. L'amélioration de la qualité de l'air intérieur passe donc prioritairement par un contrôle de l'ensemble des sources d'émission (produits de construction et de décoration, mais aussi produits d'entretien, désodorisants d'intérieur, appareils de bureautique...) ;
- les indicateurs usuellement utilisés pour qualifier l'air intérieur au regard de possibles effets chroniques sur la santé ne sont pas nécessairement adaptés au cas particulier des mesures à réception des bâtiments neufs, dans lesquels les valeurs guides pourraient être fréquemment dépassées, notamment si aucune action ciblée de sélection de produits à faibles émissions n'a été entreprise. D'autres types de valeurs guides (comme les valeurs d'action rapide que propose le HCSP [35], pour le formaldéhyde, le benzène et le tétrachloroéthylène à ce jour) ou bien des valeurs *ad hoc* pourraient être utilisées.

Les actions menées en France par l'OQAI pour la caractérisation de la qualité de l'air intérieur et de ses déterminants dans le parc immobilier, par l'ANSES pour l'élaboration de valeurs guides sanitaires de qualité d'air intérieur, par le HCSP pour les valeurs de gestion associées, et par les pouvoirs publics pour la

mise en place de l'étiquetage réglementaire des produits et le suivi d'indicateurs de qualité d'air intérieur dans certains établissements recevant du public, convergent vers le même objectif d'amélioration de la qualité de l'air des espaces clos. Cette revue bibliographique souligne l'importance de la maîtrise des sources d'émission et suggère la pertinence de la mesure d'indicateurs de qualité d'air intérieur, par exemple à réception des bâtiments neufs, pour autant que des préconisations en matière de choix de produits faiblement émissifs aient été formulées et

appliquées. Sinon, le propriétaire ou le gestionnaire du bâtiment risque de devoir gérer des dépassements de valeurs guides ou de valeurs de gestion, sans pouvoir proposer facilement des mesures d'amélioration opérationnelles. Ainsi, la mise en place prochaine de l'étiquetage réglementaire des émissions de composés volatils des produits de construction et de décoration fournira aux préconisateurs et aux utilisateurs de ces produits un outil efficace de choix de produits faiblement émissifs, première étape indispensable d'amélioration de la qualité de l'air intérieur.

Références

- [1] Kirchner S, Arènes JF, Cochet C, Derbez M *et al.* État de la qualité de l'air dans les logements français. *Environnement, Risques & Santé* 2007 ; 6 (4) : 259-69.
- [2] Air Pays de La Loire. Évaluation de la qualité de l'air intérieur dans la maison éco-performante de la Communauté de Communes du Pays des Herbiers. Octobre 2009-Janvier 2010 : 40 p.
- [3] Gunnarsen L, Logadottir A, Winter Funch L. Formaldehyde in newly built dwellings. *Proceedings of Indoor Air 2008* ; 17-22 August 2008, Copenhagen, Denmark, Paper ID 1040.
- [4] Tuomainen M, Pasanen AL, Tuomainen A *et al.* Usefulness of the Finnish classification of indoor climate, construction and finishing materials: comparison of indoor climate between two new blocks of flats in Finland. *Atmospheric Environment* 2001 ; 35 (2) : 305-13.
- [5] Tuomainen M, Liesivuori J, Tuomainen A, Pasanen AL. The 3-year follow-up study in a block of flats – experiences in the use of the Finnish indoor climate classification. *Indoor Air* 2003 ; 13 (2) : 136-47.
- [6] Järnström H, Saarela K, Kalliokoski P, Pasanen AL. Reference values for indoor air pollutant concentrations in new, residential buildings in Finland. *Atmospheric Environment* 2006 ; 40 (37) : 7178-91.
- [7] Hodgson AT, Rudd AF, Beal D, Chandra S. Volatile Organic Compound concentration and emission rates in new manufactured and site-built houses, *Indoor Air* 2000 ; 10 : 178-82.
- [8] Hodgson AT, Beal D, McIlvaine JER. Sources of formaldehyde, other aldehydes and terpenes in a new manufactured house. *Indoor Air* 2002 ; 12 (4) : 235-42.
- [9] Offerman F, Brennan S, Hodgson A *et al.* Window usage, ventilation and formaldehyde concentrations in new California homes. *Proceedings of Indoor Air 2008* ; 17-22 August 2008, Copenhagen, Denmark, Paper ID 767.
- [10] Brown SK. Volatile organic pollutants in new and established buildings in Melbourne, Australia. *Indoor Air* 2002 ; 12 (1) : 55-63.
- [11] Guo H, Murray F, Lee SC. The development of low volatile organic compound emission house – a case study. *Building and Environment* 2003 ; 38 (12) : 1413-22.
- [12] Rousselle C, Mandin C, Azuma K. Valeurs guides de qualité d'air intérieur : analyse comparative des approches française et japonaise. *Environnement, Risques & Santé* 2011 ; 12 (1) : 25-34.
- [13] Osawa H, Hayashi M. Status of the indoor air chemical pollution in Japanese houses based on the nationwide field survey from 2000 to 2005. *Building and Environment* 2009 ; 44 (7) : 1330-6.
- [14] Park JS, Ikeda K. Variations of formaldehyde and VOC levels during 3 years in new and older homes. *Indoor Air* 2006 ; 16 (2) : 129-35.
- [15] Saijo Y, Kishi R, Sata F *et al.* Symptoms in relation to chemicals and dampness in newly built dwellings. *International Archives of Occupational and Environmental Health* 2004 ; 77 (7) : 461-70.
- [16] Takeda M, Saijo Y, Yuasa M *et al.* Relationship between sick building syndrome and indoor environmental factors in newly built Japanese dwellings. *International Archives of Occupational and Environmental Health* 2009 ; 82 (5) : 583-93.
- [17] Takigawa T, Wang BL, Sakano N *et al.* A longitudinal study of environmental risk factors for subjective symptoms associated with sick building syndrome in new dwellings. *Science of The Total Environment* 2009 ; 407 (19) : 5223-8.
- [18] Takigawa T, Wang BL, Saijo Y *et al.* Relationship between indoor chemical concentrations and subjective symptoms associated with sick building syndrome in newly built houses in Japan. *International Archives of Occupational and Environmental Health* 2010 ; 83 : 225-35.
- [19] Cheong C, Kim H, An H *et al.* Volatile organic compound concentrations of 868 newly built apartments in Korea. *Proceedings of Healthy Buildings*. Lisbon, 4-6 June 2006, III : 403-8.

- [20] Jo WJ, Sohn JY. The effect of environmental and structural factors on indoor air quality of apartments in Korea. *Building and Environment* 2009 ; 44 (9) : 1794-802.
- [21] Kim SS, Kang D-H, Choi D-H *et al.* Comparison of strategies to improve indoor air quality at the pre-occupancy stage in new apartment buildings. *Building and Environment* 2008 ; 43 (3) : 320-8.
- [22] Lim S, Lee K, Seo S, Jang S. Impact of regulation on indoor volatile organic compounds in new unoccupied apartment in Korea. *Atmospheric Environment* 2011 ; doi:10.1016/j.atmosenv.2011.01.020
- [23] Seaman VY, Bennett DH, Cahill TM. Origin, occurrence, and source emission rate of acrolein in residential indoor air. *Environmental Science & Technology* 2007 ; 41 (20) : 6940-6.
- [24] Saito I, Onuki A, Seto H. Indoor organophosphate and polybrominated flame retardants in Tokyo. *Indoor Air* 2007 ; 17 (1) : 28-36.
- [25] Saito I, Onuki A, Seto H. Indoor air pollution by alkylphenols in Tokyo. *Indoor Air* 2004 ; 14 (5) : 325-32.
- [26] Raw GJ, Coward SKD, Brown VM, Crump DR. Exposure to air pollutants in English homes. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology* 2004 ; 14 : S85-S94.
- [27] Lethrosne M *et al.* Observatoire de la qualité de l'air intérieur. Travaux à paraître.
- [28] Gilbert NL, Guay M, Miller JD *et al.* Levels and determinants of formaldehyde, acetaldehyde and acrolein in residential indoor air in Prince Edward Island, Canada. *Environmental Research* 2005 ; 99 (1) : 11-7.
- [29] Guo H, Kwok NH, Cheng SC *et al.* Formaldehyde and volatile organic compounds in Hong Kong homes: concentrations and impact factors. *Indoor Air* 2009 ; 19 (3) : 206-17.
- [30] Hun DE, Corsi RL, Morandi MT, Siegel JA. Formaldehyde in residences: long-term indoor concentrations and influencing factors. *Indoor Air* 2010 ; 20 (3) : 196-203.
- [31] Yang W, Sohn J, Kim J *et al.* Indoor air quality investigation according to age of the school buildings in Korea. *Journal of Environmental Management* 2009 ; 90 : 348-54.
- [32] Batterman S, Godwin C, Chernyak S. Brominated flame retardants in offices in Michigan, USA. *Environment International* 2010 ; 36 : 548-56.
- [33] Girman JR, Alevantis LE, Kulasingam GC *et al.* The bake-out of an office building. A case study. *Environment International* 1989 ; 15 : 449-53.
- [34] Kang DH, Choi DH, Lee SM. Effect of bake-out on reducing VOC emissions and concentrations in a residential housing unit with a radiant floor heating system. *Building and Environment* 2010 ; 45 (8) : 1816-25.
- [35] Haut Conseil de la santé publique. Valeurs repères d'aide à la gestion dans l'air des espaces clos, Présentation de la démarche méthodologique. Octobre 2009, 23 p.

